

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2019

Santeri Haapasalo

PAPERILINJAN ILMAKUIVAIMEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Valmet Oyj

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2019 | 42 sivua, liitteet 11 sivua

Santeri Haapasalo

PAPERILINJAN ILMAKUIIVAIMEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Valmet Oyj

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää ja tutkia keinoja paperilinjan ilmakuiivaimen energiahäviöiden vähentämiseksi vastakaukalon rakenteen ja mallin muodossa. Opinnäytetyö tehtiin Valmet Oyj:lle, ja sen aihe on sidoksissa jo aiemmin toteutettuun projekti A:han, jossa kehitettiin ensimmäistä kertaa vastakaukalo ilmakuiivaimen yhteyteen. Vastakaukalo on laite, joka asennetaan vastapäätä ilmakuiivainta. Vastakaukalon ja ilmakuiivaimen välissä kulkee paperirata. Projekti A:n kautta ilmenneet kehitystarpeet ovat keskeisessä osassa opinnäytetyössä, jonka tarkoituksena oli tutkia kustannus- ja energiatehokkuudelta parempaa ratkaisua yli 4 m ilmakuiivaimille.

Vastakaukalon ensisijaisena tarkoituksena on energiateknisen hyötysuhteen parantaminen sekä konesalin lämpö- ja kosteuskuorman vähentäminen. Vastakaukalo mahdollistaa normaalisti häviöksi muodostuvan ilmavuodon talteenoton, mikä puolestaan sekundäärienergiana käytettynä mahdollistaa paremman energiatehokkuuden saavuttamisen prosessissa.

Työn eteneminen alkoi tutustumalla projektissa A toteutettuun ratkaisuun ja sen pohjalta ilmenneisiin kehitystarpeisiin. Tämän jälkeen alettiin suunnittelemaan tuotetta, joka täyttäisi kyseiset tarpeet ja opinnäytetyön tarkoituksen. Palaverien ja asiantuntijahaastatteluiden pohjalta valikoitui versiot, joiden ilmateknisiä ominaisuuksia testattiin simulointiohjelmistossa. Tämän jälkeen valittiin yksi versio, josta tehtiin tarkempi mallinnus. Tarkemman mallin pohjalta saatujen tietojen avulla voitiin tehdä kustannuslaskelmat.

ASIASANAT:

Valmet Oyj, energiatehokkuus, tuotekehitys, teollisuus.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Engineering

2019 | 42 pages, 11 pages in appendices

Santeri Haapasalo

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A PAPER LINE AIR DRYER

Valmet Oyj

The purpose of this thesis was to develop and investigate ways to reduce the energy losses of a paper line air dryer in the form of a counterpart structure and model. The thesis was commissioned by Valmet Corporation and the topic of the thesis is related to the previously implemented project A, where a counterpart was developed for the first time in connection with a paper line air dryer. The counterpart is a device that is mounted opposite to the air dryer, and the paper web runs between the two. The development needs that emerged during the project A are the key elements in this thesis, the primary purpose of which was to investigate better solutions for the counterpart when used in connection to air dryers over 4 meters in length.

The primary purpose of the counterpart is to improve the energy efficiency and reduce the air pollution load in paper mill working environments. The counterpart allows the recovery of hot air which is normally lost in the process. This in turn, when used as a secondary energy, enables better energy efficiency in the whole process.

The work began by examining the previously implemented project A and the development needs that emerged during the project. After this began the planning phase together with internal meetings. Conducting expert interviews was also an invaluable asset for the thesis. The main point was to find a solution that would meet the needs and purpose of the thesis. Few versions were selected after the planning phase and those were tested with simulation software. One version was chosen for further development after examining the results. The more detailed model enabled the cost calculations.

KEYWORDS:

Valmet Oyj, energy efficiency, product development, industry

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	1
2 LÄHTÖTIEDOT	2
2.1 Valmet Oyj	2
2.2 Työn tavoitteet ja tarkoitus	4
3 VALMETIN ILMAKUIVAIMET	5
3.1 Yleistä tietoa	5
3.2 OptiDry Coat -ilmakuivaimet	6
4 TEHOKAS ENERGIANKÄYTTÖ	8
4.1 Energiatehokkuus	8
4.2 Lämmöstä saatava energiahyöty	12
5 PROJEKTI A	15
5.1 Tuotteen tarkoitus ja toiminta	15
5.2 Nykyinen rakenne ja käytetyt materiaalit	17
5.3 Energiansäästö ja kustannukset	20
5.4 Todetut kehitystarpeet	23
6 VASTAKAUKALON KEHITYS YLI 4 M KONEILLE	24
6.1 Rakenne	24
6.2 Materiaali	25
6.2.1 Säänkestävä teräs	25
6.2.2 Ferriittinen teräs (musta teräs)	26
6.2.3 Ruostumattomat teräkset	27
6.3 Ratasäätö	28
6.4 Vastakaukalon muoto	29
6.4.1 Malli 1	30
6.4.2 Malli 1 päätylevyllä	30
6.4.3 Malli 2	31
6.4.4 Malli 2 päätylevyllä	31
6.4.5 Malli 3	31
6.4.6 Malli 4	32
6.4.7 Malli 5	32

6.4.8 Malli 6	33
6.5 Jatkokehitys	34
6.5.1 Versio 1	35
6.5.2 Versio 2	36
6.5.3 Materiaalikustannukset	37

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 38

LÄHTEET 41

LIITTEET

Liite 1. Prosessi-, 3D-, virtausmallinnus- ja rakennekuvat. (Salassa pidettävä, ei julkaistu)

KAAVAT

Kaava 1. Ominaisenergiankulutus (Heikkilä ym. 2008, 21.)	8
--	---

KUVAT

Kuva 1. Valmetin historia (Valmet 2018.)	3
Kuva 2. Valmetin OptiDry Coat -mallistoa (Valmet 2018b.)	6
Kuva 3. Energian kulutus ja veden haihtuminen verrattuna perinteisiin kaasu- ja infrapunakuivaimiin (Valmet 2018b.)	7
Kuva 4. Esimerkki ratkaisusta energiatehokkuuden parantamisesta (Heikkilä ym. 2008, 21.)	9
Kuva 5. Tehdasympäristön energiatehokkuuden jatkuva parantaminen (Heikkilä ym. 2008, 28.)	11
Kuva 6. Energiatehokkuuden mittarointia teollisuusympäristössä (Heikkilä ym. 2008, 25.)	13
Kuva 7 Yksinkertaistettu kuva vastakaukaloiden sijainnista	15
Kuva 8 Yksinkertaistettu PI-kaavio	16
Kuva 9 Yksinkertaistettu kuva kannatinlaitteista 1/2	17
Kuva 10 Yksinkertaistettu kuva kannatinlaitteista 2/2	18
Kuva 11 Yksinkertaistettu kuva vastakaukalosta	19
Kuva 12 Korvausilmapellin aukio	20
Kuva 13 Alkuperäinen teoreettinen energiankulutus ja hyötysuhde	21
Kuva 14 Korvausilman avulla saavutettu teoreettinen energiankulutus ja hyötysuhde	21
Kuva 15. Energiankulutus	22

Kuva 16 Mitatut lämpötilat vastakaukalon sisältä	22
Kuva 17 Painovertailu	39

TAULUKOT

Taulukko 1. Energiatehokkuusvertailu (Valmet 2018b.)	6
--	---

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää ja tutkia keinoja paperilinjan ilmakeivaimen energiahäviöiden vähentämiseksi vastakaukalon rakenteen ja mallin muodossa. Opinnäytetyön aihe on sidoksissa jo aiemmin toteutettuun projekti A:han, jossa kehitettiin ensimmäistä kertaa vastakaukalo ilmakeivaimen yhteyteen. Vastakaukalo on laite, joka asennetaan vastapäätä ilmakeivainta, ja näiden välissä kulkee paperirata.

Vastakaukalon ensisijaisena tarkoituksena on energiateknisen hyötysuhteen parantaminen sekä salikuorman vähentäminen. Vastakaukalo mahdollistaa normaalisti häviöksi muodostuvan ilmakeivaimen talteenoton, mikä puolestaan sekundäärienergiana käytettynä mahdollistaa paremman energiatehokkuuden saavuttamisen prosessissa.

Projekti A:n kautta ilmenneet kehitystarpeet ovat keskeisessä osassa työssä, ja tarkoituksena on tutkia kustannus- ja enegiatehokkuudeltaan parempaa ratkaisua yli 4m ilmakeivaimille. Tämä pyritään saavuttamaan työssä kahden, pienemmän reunavastakaukalon muodossa. Työn keskeisenä tarkoituksena on tutkia vastakaukalon muotoa ilmavirtauksien käyttäytymisen kannalta.

Tässä opinnäytetyössä esiintyvät mallinnetut kappaleet ja piirustukset ovat tehty Catia V5- ja -V6- sekä AutoCAD-suunnitteluohjelmistoilla. Virtausmallit on simuloitu käyttäen COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmistoa. Salassapitovelvollisuuden vuoksi vastakaukalon tietoja ei kerrota yksityiskohtaisesti ja yleisesti opinnäytetyössä tullaan salaamaan Valmetin salaiseksi luokitellut menetelmät ja tiedot.

2 LÄHTÖTIEDOT

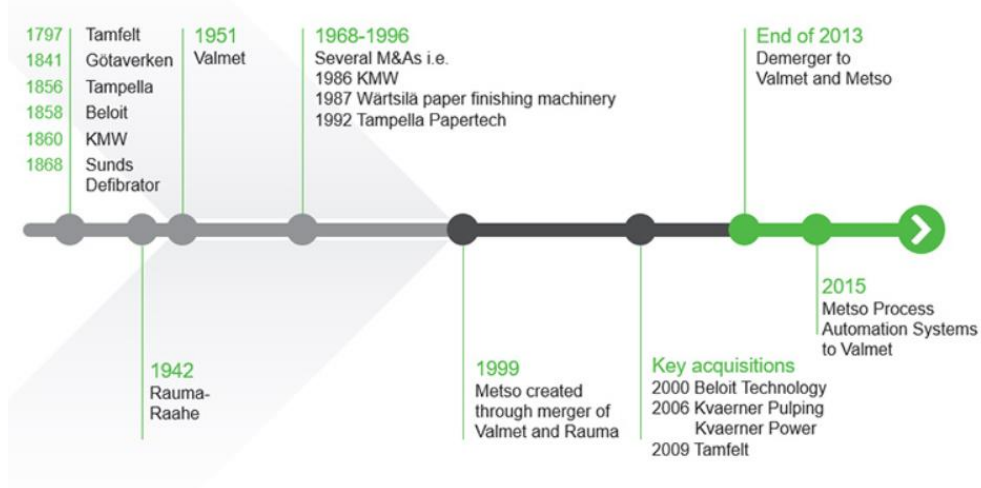
2.1 Valmet Oyj

Valmet Oyj on kansainvälinen, yksi maailman johtavia teknologian, automaation ja palveluiden toimittaja ja kehittäjä sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Valmetin monipuolinen palvelu- ja teknologiatarjonta kattaa niin kunnossapidon ulkoistuksen kuin voimalaitosten uudistusparannukset ja varaosat. Vankan teknologiatarjonnan pohjana ovat sellutehtaat, pehmopaperin-, kartongin- ja paperinvalmistuslinjat sekä bioenergiaa tuottavat voimalaitokset. (Valmet 2018.)

Valmet toimii 33 eri maassa ja sen globaali läsnäolo koostuu yli 120 palvelukeskuksesta. Sen piiriin kuuluvat 86 myyntikonttoria, 34 tuotantolaitosta ja 16 T&K-keskusta. Maailmanlaajuisesti Valmetin henkilöstö kattaa yli 12 000 ammattilaista, ja toiminta-alueet on jaettu viiteen eri alueeseen: Pohjois-Amerikka, Etelä-Amerikka, EMEA (Eurooppa, Lähi-Itä ja Afrikka), Aasian ja Tyynenmeren alue sekä Kiina. (Valmet 2018.)

40 % maailman paperin- ja kartongintuotannosta on tuotettu Valmetin paperikoneilla. Valmetin visiona onkin tulla maailman parhaaksi asiakkaidensa palvelussa ja sen tavoitteena on kehittää uusia tuotteita ja prosesseja, jotka tyydyttävät asiakkaiden tarpeet niin energian- kuin materiaalikulutuksen osalta. (Valmet 2018a.)

Valmetin monipuolinen ja monivaiheinen historia ulottuu yli 200 vuoden päähän, ja Valmet on kokonaisuus useasta yrityksestä, jotka on perustettu jo 1800-luvulla. Kuvassa 1 on esitelty Valmetin historiaa ja välivaiheita vuosien varrelta. Kuvasta käy ilmi erinäiset yritykset, joiden pohjalta Valmet on saavuttanut nykyisen asemansa.



Kuva 1. Valmetin historia (Valmet 2018.)

Joulukuussa 2013 yhtiö syntyi uudestaan sellu-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnan irtautuessa Metso Oyj:stä. Valmetin liikevaihto vuonna 2017 kohosi noin 3,1 miljardiin euroon, sen pääkonttori sijaitsee Espoossa ja se on listattu Helsingin pörssiin. (Valmet 2018.)

2.2 Työn tavoitteet ja tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ja kehittää reunavastakaukaloa yli 4 m ilmakeivaimille. Nykyinen, koko ilmakeivaimen pituuden kattava ratkaisu toteutettiin projektissa A vuonna 2017, ja sen pohjalta saatujen kokemusten kautta on todettu tarve tuotekehitykselle.

Suuren koon vuoksi rakennelmasta tuli erittäin raskas, vaikkakin samaan aikaan tukeva. Suuremman laitekoon vuoksi myös kustannukset olivat suuremmat. Ilmakeivaimien yhteydessä tapahtuvat ilmavuodot aiheutuvat lähinnä ilmakeivaimen reunojen kautta, joten yli 4 m ilmakeivaimissa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää pienempiä, kustannustehokkaampia ratkaisuja reunakaukaloiden muodossa.

Kahden pienemmän reunavastakaukalon avulla myös rakennetta voitaisiin keventää, jolloin materiaalikustannukset vähenisivät ja reunakaukaloiden kiinnitys olisi yksinkertaisempaa. Samaan aikaan radan sisäpuolisesta tiiviyydestä tulisi kuitenkin ongelma, ja haasteeksi muodostuukin paperiradan käyttäytyminen sitä kuivatessa.

Rainalla tarkoitetaan paperikoneessa ajettavaa kuituverkosta. Paperikoneen avulla seoksesta syntyy jatkuva paperirata. (Metsäyhdistys, 2018.)

Säädön mahdollisuus on hyvä ottaa myös huomioon, sillä paperirata käyttäytyy suuttimien kohdalla menemällä hieman kuperaksi ilmakeivaimen suuttimista puhallettavan ilmavirran johdosta. Sama käyttäytyminen ilmenee myös paperiradan läpiviennin kanssa, joten reunavastakaukalon sisempi reuna ei saa aiheuttaa turvallisuus- tai laaturiskiä vietävälle rainalle.

3 VALMETIN ILMAKUIVAIMET

3.1 Yleistä tietoa

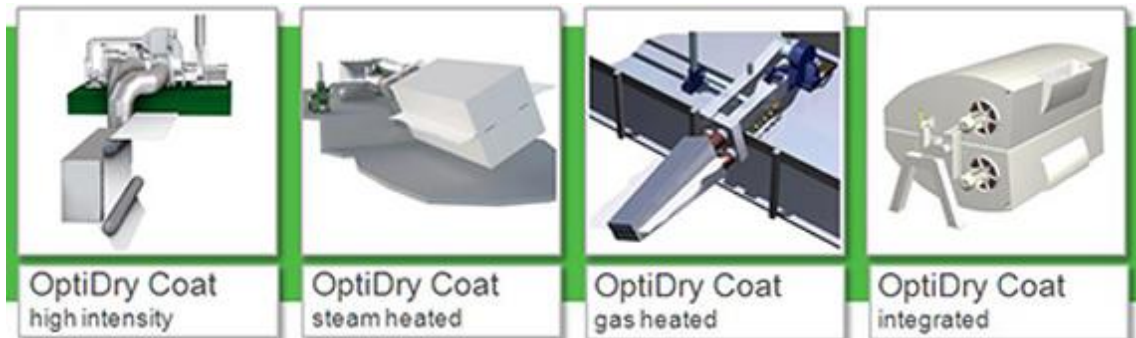
Kuivausosan avulla paperiradasta poistetaan vettä haihduttamalla. Tyypillisesti käytetyt menetelmät paperin ja kartongin kuivaamiseksi ovat monisyylinterinen kuivaus ja ilmakuivaus. Riippumatta valitusta kuivausmenetelmästä on kuitenkin erittäin tärkeää saavuttaa mahdollisimman hyvä kuivaustehokkuus ja minimoida energiankulutus. (Valmet 2018d.) Näin koko prosessin energiatehokkuutta saadaan lisättyä, ja se puolestaan edesauttaa kustannuksien vähentämisessä ja sen avulla saavutetaan mahdollisimman hyvä asiakastyytyväisyys.

Tehokas ilmanvaihto ja lämmön talteenotto sekä maltillinen höyryn, kaasun ja sähkönkulutus, joiden avulla Valmetin kuivaimissa on pyritty saavuttamaan mahdollisimman hyvä energiatehokkuus. (Valmet 2018d.) Vapaaviennit aiheuttavat paperiradan jäähtymistä, ja niiden minimoimisella vähennetään myös riskejä, jotka saattaisivat aiheuttaa seisokin. Täten saavutetaan häiriötön rainan liikkuminen ja tuotannon jatkuminen riippumatta koneen nopeudesta ja käytettävän tuotteen laadusta.

Valmetin tarjoamat kuivaustekniikat eivät ainoastaan lisää tuotannon energiatehokkuutta, vaan ne parantavat omalta osaltaan koko tuotantoyksikön tehokkuutta suuremman nopeuden ja ajettavuuden valvonnan kannalta koko tuotantolinjan läpi. Valmet tarjoaa ratkaisuja riippumatta tuotteen laadusta, käytettävästä koneen nopeudesta tai neliömassasta. (Valmet 2018d.)

3.2 OptiDry Coat -ilmakuivaimet

OptiDry Coat -ilmakuivaimet (Kuva 2.) on suunniteltu vaativiin, suuren kapasiteetin kuivaustarpeisiin. Patentoitujen ilmankuivaussuuttimien avulla kuivaimet saavuttavat tasaisen haihdutuksen pienellä energiankulutuksella. Niiden avulla varmistetaan hyvä hyötysuhde ja ajettavuus. (Valmet 2018b.)



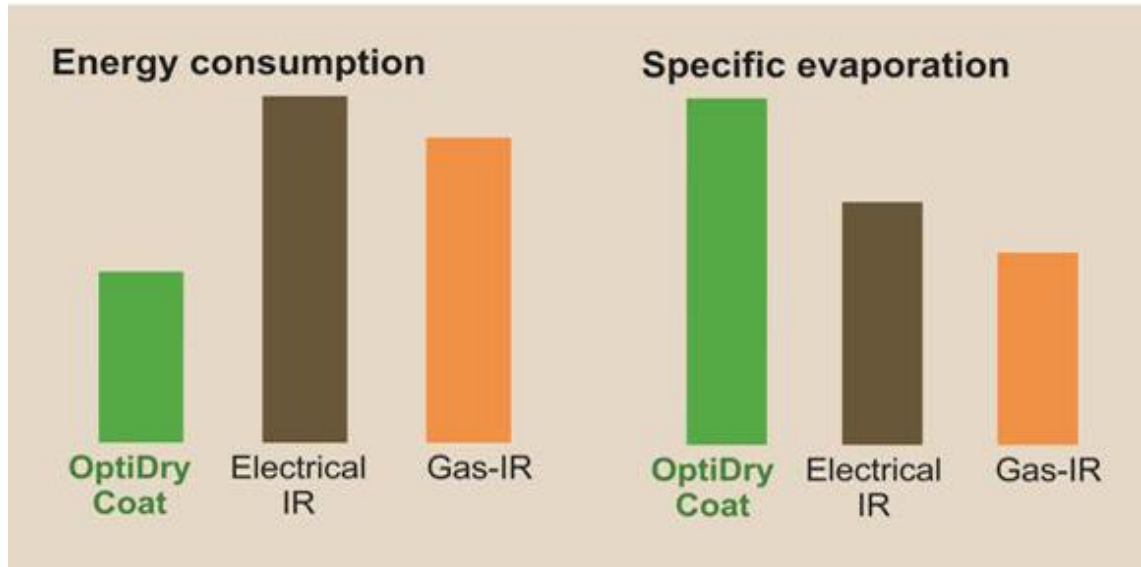
Kuva 2. Valmetin OptiDry Coat -mallistoa (Valmet 2018b.)

Kyseisiä kuivaimia on käytännössä kahta eri tyyppiä, joilla kummallakin on useita eri sovellusmahdollisuuksia. OptiDry Coat High Intensity on energiatehokas ilmakuivain infrapunakuivaimien korvaamiseen ja OptiDry Coat -ilmakuivaimet on tarkoitettu kaikkiin pinnoituskuivauksiin useilla lämmitys- ja asettelumahdollisuuksilla. (Valmet 2018b.)

Päällystyskuivaus on yksi energiavaativimmista prosesseista ja ilmakuivaimilla energiakustannukset on mahdollista puolittaa (Kuva 3). Valmetin tarjoamilla kuivaimilla saavutetaan jopa 50 % energiansäästö verrattuna perinteisiin infrapunakuivaimiin (Taulukko 1). OptiDry Coat -ilmakuivaimet soveltuvat niin paperin kuin kartongin kuivaamiseen ja niitä voidaan käyttää niin uusissa koneissa kuin vanhojen koneiden uudistamisessa. (Valmet 2018c.)

Taulukko 1. Energiatehokkuusvertailu (Valmet 2018b.)

	Energiatehokkuus (%)
Valmetin ilmakuivaimet	70-90
Infrapunakuivaimet	30-40



Kuva 3. Energian kulutus ja veden haihtuminen verrattuna perinteisiin kaasu- ja infrapunakuivaimiin (Valmet 2018b.)

Kaasulla ja sähköllä toimivien infrapunakuivaimien matala hyötysuhde johtuu suurista häviöistä jäähdytysilmaan (sähkö) tai poistoilmaan siirtyvistä energiahäviöistä (kaasu) sekä siirto- ja heijastushäviöistä. Noin 30–50 prosenttia kaasuenergiasta konvergoituu infrapunasäteilyksi. Kaasun energiasta noin 25–35 prosenttia imeytyy paperirainaan lämpösäteilynä ja lisäksi noin 2–3 prosenttia konvektiivisenalämmönsiirtona. Infrapunasäteily imeytyy osittain paperirataan, osa heijastuu pois ja osa säteilystä katoaa siirron aikana. Sähköä käyttävissä infrapunakuivaimissa on lisäksi kvartsilasi, joka likaantuessaan voi myös vähentää energiansiirtoa. (Valmet 2018d.)

OptiDry Coat -ilmakuivaimien avulla vältetään paperirainan tarpeettomalta kuumentamiselta, ja korkea energiatehokkuus pitää lämpökuorman konehuoneessa pienenä. Huoltojaksot ovat lyhyempiä, sillä Valmetin ilmakuivaimet vaativat vähemmän puhdistusta verrattuna perinteisiin infrapunakuivaimiin. Kunnossapidon rooli jää myös vähäisemmäksi, sillä ilmakuivaimet eivät vaadi säännöllisiä kulutusosien vaihtoa. Kyseisiä kulutusosia ovat muun muassa säteilijöiden tai lamppujen vaihdot. Tyypillisesti infrapunakuivaimien säteilijät joudutaan vaihtamaan 2–4 vuoden välein. Lisäksi OptiDry-ilmakuivaimien kaasupoltin ja kiertoilmapuhallin sijaitsevat koneen ulkopuolella LTO-tasolla (lämmön talteenotto) tai puhallinhuoneessa, joten mahdollisten huoltotoimenpiteiden tekeminen on näin ollen helpompaa. (Valmet 2018d.)

4 TEHOKAS ENERGIANKÄYTTÖ

4.1 Energiatehokkuus

Yleisesti energiatehokkuudella, sen parantamisella tai siihen tavoittelulla tarkoitetaan eri tavoitteiden saavuttamista. Näitä voivat olla niin kasvihuonepäästöjen vähentäminen, huoltovarmuuden parantaminen kunnossapidon kannalta kuin kustannusten alentaminen. Kiteytettynä energiatehokkuus tarkoittaaakin energiankäytön hyötysuhdetta. Energiatehokkuus on kuitenkin käsitteenä laaja ja joissain tapauksissa myös hankalasti määriteltävä, varsinkin jos tarkoituksena on vertailla eri teollisuusalojen välisiä energiatehokkuuksia. (Heikkilä, Huumo, Siitonen, Seitsalo & Hyytiä 2008, 20.)

Energiatehokkuudella voidaan tarkoittaa energiankulutuksen suhdetta tuotettuun tuotemäärään, mikä teollisuudessa tarkoittaa yleisesti tuotetonnia. Käytännössä tämä tarkoittaa prosessin sisään syötetyn energiapanoksen avulla aikaansaatua tuotannon määrää. Tätä kutsutaan usein fyysiseksi energiatehokkuudeksi. Myös taloudellista ja termodynaamista tehokkuutta käytetään energiatehokkuuden mittaamiseen, kun se on tarkasteltavan prosessin kannalta hyödyllistä ja tarkoituksenmukaista. (Heikkilä, ym. 2008, 20.)

Prosessin tai laitoksen ominaisenergiankulutus (Specific Energy Consumption, SEC) voidaan tuotannon kanssa määritellä seuraavasti (Kaava 1.):

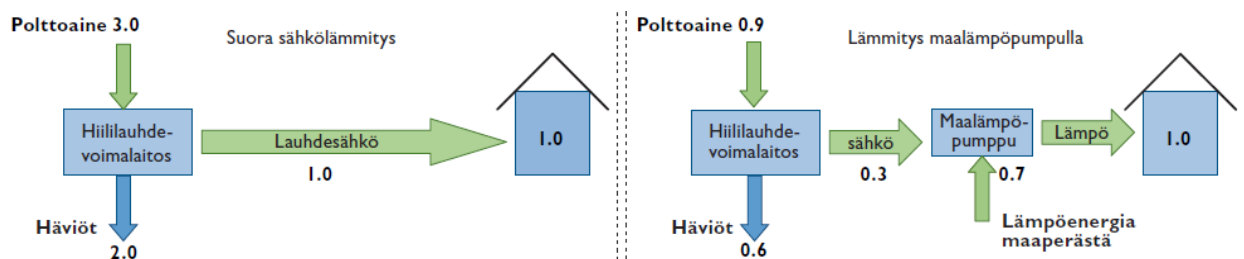
$$SEC = \frac{\text{energiankäyttö}}{\text{tuotantomäärä}} \left[\frac{\text{GJ}}{t} \right] \text{ tai } \left[\frac{\text{MWh}}{t} \right]$$

Kaava 1. Ominaisenergiankulutus (Heikkilä ym. 2008, 21.)

Energiätehokkuuden parantamisella voidaan tarkoittaa muun muassa seuraavia asioita:

- saman tuotantomäärän tai sen arvon saavuttaminen alhaisemmalla energiankulutuksella tai sen optimoinnilla (Kuva 4.)
- vastaavasti suuremman tuotantomäärän saavuttaminen samalla energiankulutuksella
- suuremman tuotantomäärän tai sen arvon kasvun aikaansaamista suhteellisen pienen energiankulutuksen nousulla.

Prosessi- tai laitetason energiatehokkuuden parantaminen on kiinteässä yhteydessä itse tuotantoprosessiin, käyttöoloihin ja -tapoihin sekä laitteiden kuntoon, ikään ja käytettyyn tekniikkaan. (Heikkilä ym. 2008, 20.)



Kuva 4. Esimerkki ratkaisusta energiatehokkuuden parantamisesta (Heikkilä ym. 2008, 21.)

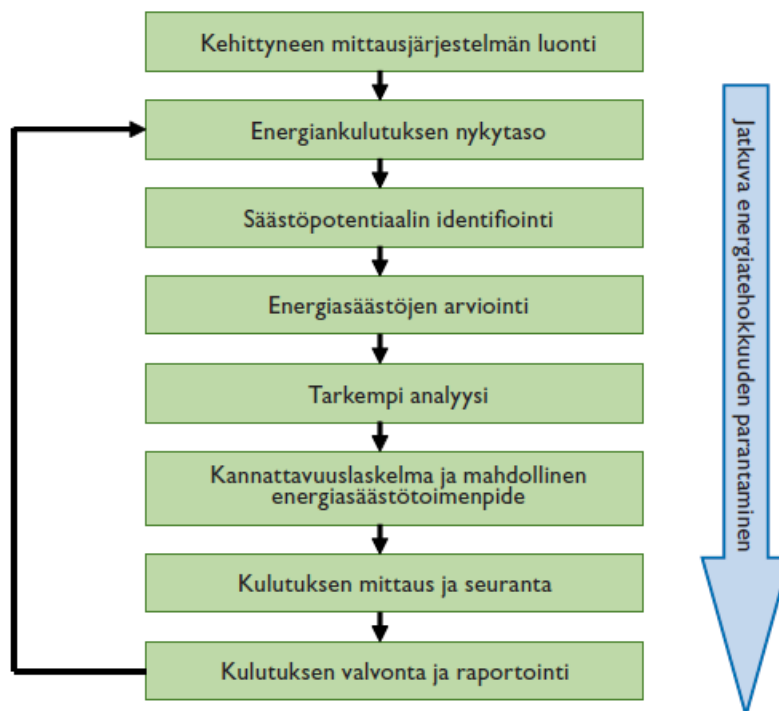
Termodynamiikan pääsäännön mukaan hyötysuhde ei koskaan voi olla yli 100 %, ja tämän vuoksi kaikkiin prosesseihin liittyykin tietynlaisia energiahäviöitä (kuten lämpöhäviöt). Kyseisiä häviöitä voidaan kuitenkin minimoida erilaisilla energiatehokkuutta edistävillä tekniikoilla ja energiansäästämahdollisuuksien tunnistamisella. Näihin voivat vaikuttaa muun muassa:

- energiankäytön & kulutuksen riittävä kartoitus, hallintamenetelmien käyttö
- suunnitelmallinen jatkuva parantaminen ja kunnossapito
- laitteiden käyttöaikojen valvonta ja turhien käynnissäoloaikojen vähentäminen
- optimoimalla varsinaiseen prosessiin liittyvät oheisjärjestelmät ja niiden toiminnot
- eristysten riittävyden varmistaminen ja tarvittaessa lisääminen
- kohteessa käytetyn energiamäärän/lajin optimointi prosessiin nähden
- mahdollisuudet käyttää vaihtoehtoisia energialähteitä joko tuotannon ulkopuolelta tai hyödyntää muiden prosessien kautta sekundäärienergian muodossa
- mahdollisuus nostaa prosessin lämpötilaa/lämmön energiasisältöä.

Laitoksen tai prosessin energiatehokkuutta parannettaessa tulee niihin vaikuttavat tekijät tunnistaa ja määrittellä. Laajemmissa kohteissa, joissa on useita erilaisia prosesseja ja erinäisiä energian kuluttajia, kuten moottoreita ja puhaltimia, voidaan ensisijaisesti kohdistaa tiedonkeruu vain suurimpiin energiankuluttajiin. Pienissä kohteissa suurpiirteinen kartoitus voi olla riittävä. Yleisesti tuotantoyksikössä energiatehokkuutta on hyvä kuitenkin seurata tarkasti. Kuten mainittua, tämä voidaan saavuttaa vertaamalla energiankulutusta tuotettuun lopputuotemäärään (ominaisenergiankulutus). Vertailupohjana voidaan käyttää myös historiatietoja tai vastaavien tuotantokoneiden ominaisenergiankulutuksia. (Heikkilä ym. 2008, 20, 43.)

Edellä mainittujen asioiden pohjalta tehdään tarvittavat analyysit ja kannattavuuslaskelmat. Tehdasympäristön energiatehokkuuden parantamisen tulee olla jatkuva prosessi, jotta laitoksen tai prosessien toimintaa voidaan ehostaa ja optimoida tasaisesti (Kuva 5.). Tehdasympäristössä yksi isoimmista haasteista on tuotantonopeuden kasvu laitepäivitysten ja toimintatapojen kehittymisen myötä. Tiettyyn tuotantomäärään mitoitettut laitteet jäävät helposti liian pieniksi tarvittavaan tuotantokapasiteettiin nähden. Tästä seurauksena laitteet voivat aiheuttaa muun muassa lämpö- ja painehäviöitä, tai ne voivat yksinkertaisesti toimia huonolla hyötysuhteella. Jos energiankäytön mittausjärjestelmät eivät pysy laitekehityksen perässä, tällaista negatiivista kehitystä voi olla vaikea havaita. (Heikkilä ym. 2008, 27.)

Yksittäisten laitteiden ja prosessien energiataseita ja kulutuksia pitää olla mahdollista tarkkailla mittaritietojen avulla. Näin saatuja tietoja voidaan verrata sopivaan referenssitasoon. Prosessitason mittaroinnin tulee olla kunnossa, jotta luotettavan energiantehokkuusanalyysin tekeminen on mahdollista. Kattava mittarointi on myös hyödyksi tuotantolinja- ja tehdastasolla (Kuva 6.) (Heikkilä ym 2008, 27.)



Kuva 5. Tehdasympäristön energiatehokkuuden jatkuva parantaminen (Heikkilä ym. 2008, 28.)

4.2 Lämmöstä saatava energiahyöty

Teollisuus jatkaa alati ponnistelujaan tuotantolaitosten energiatehokkuuden parantamiseksi. Samalla teollisuuslaitokset ovat parantaneet, tai parantavat, energian tuottavuuttaan.

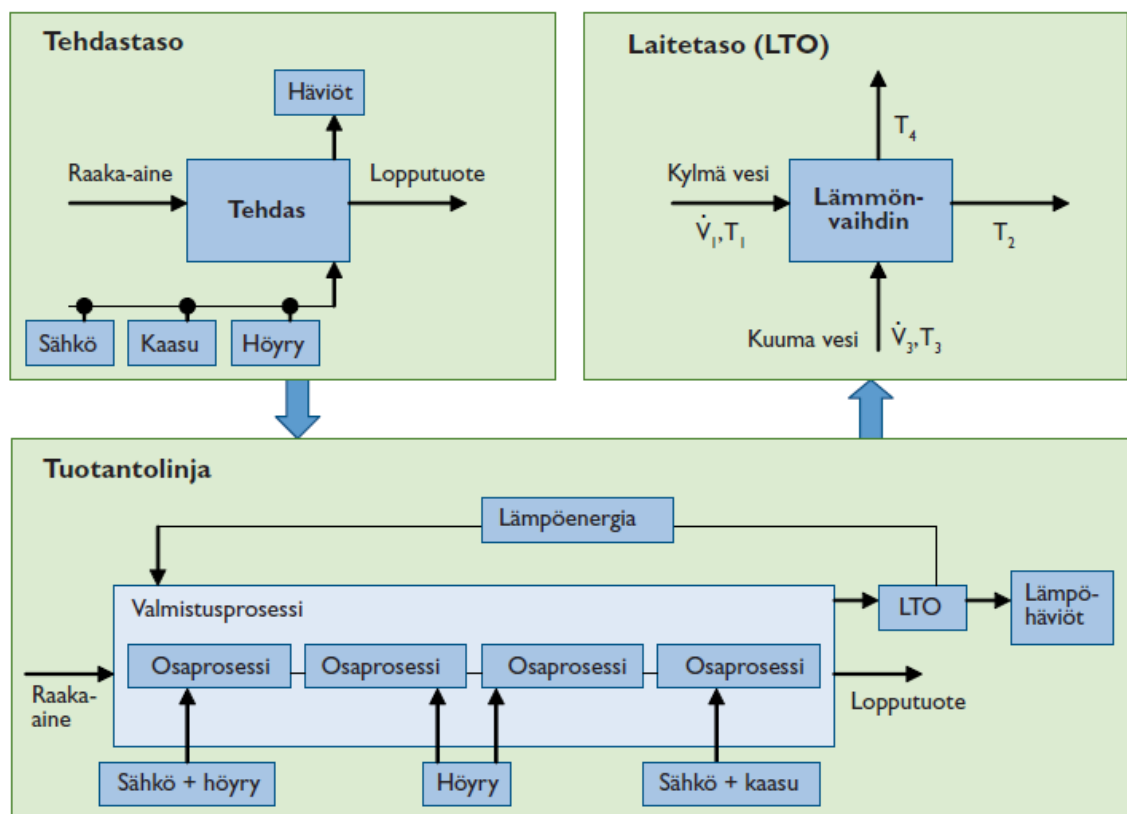
Lämpöhäviöiden talteenotto tarjoaakin asiaan houkuttelevan mahdollisuuden, sillä se on yksi merkittävimmistä keinoista, joilla teollisuuslaitosten sekä prosessien energiatehokkuutta voidaan parantaa jo pienellä uudistamisella. (U.S. Department of Energy, 2008, v.)

Teollisuuden ylijämpöä voidaan hyödyntää ja useat teollisuudenalat käyttävätkin jätelämpöä hyödyksi muun muassa sähkön- ja kaukolämmöntuotannossa. Jätelämpöhäviöt johtuvat sekä laitteiden tehottomuudesta, että laitteiden ja prosessien termodynaamisista rajoituksista. (U.S. Department of Energy, 2008, 1.)

Suomessa Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n johdolla toteutetussa tutkimusohjelmassa keskeistä oli kaukolämpö, sillä se on Suomessa laajasti käytössä. Viisi vuotta kestänyt tutkimusohjelma päättyi joulukuussa 2016, ja siihen osallistui 11 yritystä ja 5 tutkimuslaitosta. Ohjelman budjetti oli 12 miljoona euroa, ja energiajärjestelmäskenaariot toteutettiin CLIC Innovation Oy:n koordinoimassa Energian tehokas käyttö (EFEU) -tutkimusohjelmassa. (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2016.)

Tutkimuksen pohjalta syntyneen skenaarion mukaan kaukolämmön energiatehokkuutta on mahdollisuus lisätä runsaasti. Jätelämmön hyödyntäminen oli suuressa roolissa päästöjen vähentämisessä ja keskitetysti tuotetun lämmön tarvetta on mahdollista pienentää jopa noin 30 prosenttia, kun 20-25 prosenttia kaukolämmöstä tuotetaan teollisuuden ylijämpöllä, vaikka rakennuskannan energiatehokkuuden oletetaan paranevan tulevaisuudessa. Näin voidaan saavuttaa jopa 50 prosentin päästövähennykset. (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2016.)

Yleisesti teollisuuden jätelämmön talteenotto voidaan saavuttaa eri menetelmillä. Lämpöä voidaan käyttää uudelleen hyödyksi samassa prosessissa, tai se voidaan siirtää toisen prosessiin, jossa se vähentää kustannuksia ja parantaa kyseisen yksikön energiatehokkuutta (Kuva 6.). Esimerkiksi teollisuudessa palamisen tuotteena syntyvät pakokaasut voidaan ohjata ja uudelleenkäyttää palamisilman esilämmitykseen tai lämmönvaihdinta voitaisiin käyttää lämpöenergian siirtämiseen palamispakokaasuista kuivausuunissa tarvittavaan kuumaan ilmaan. (U.S. Department of Energy, 2008, 2.)



Kuva 6. Energiatehokkuuden mittarointia teollisuusympäristössä (Heikkilä ym. 2008, 25.)

Tällaiset energian talteenottomenetelmät ovat mahdollisuuksia, joilla teollisuuslaitokset voivat huomattavasti vähentää fossiilisten polttoaineiden kulutusta ja niihin liittyviä käyttökustannuksia sekä epäpuhtauspäästöjä. Lämpöhäviön vähentäminen paitsi laskee myös energia- ja ylläpitokustannuksia, mutta se voi myös minimoida ilman epäpuhtauspäästöt ja parantaa tuottavuutta. (EXX, 2018)

Talteenotettu lämpö voi siis suoraan korvata fossiilista energiaa, joka olisi muutoin käytetty esimerkiksi uunissa tai tuloilman lämmityksessä. Taloudellisten hyötyjen lisäksi jätelämmön talteenotto on keino käyttää energiaa, josta ei synny kasvihuonepäästöjä. (U.S. Department of Energy, 2008, 2.)

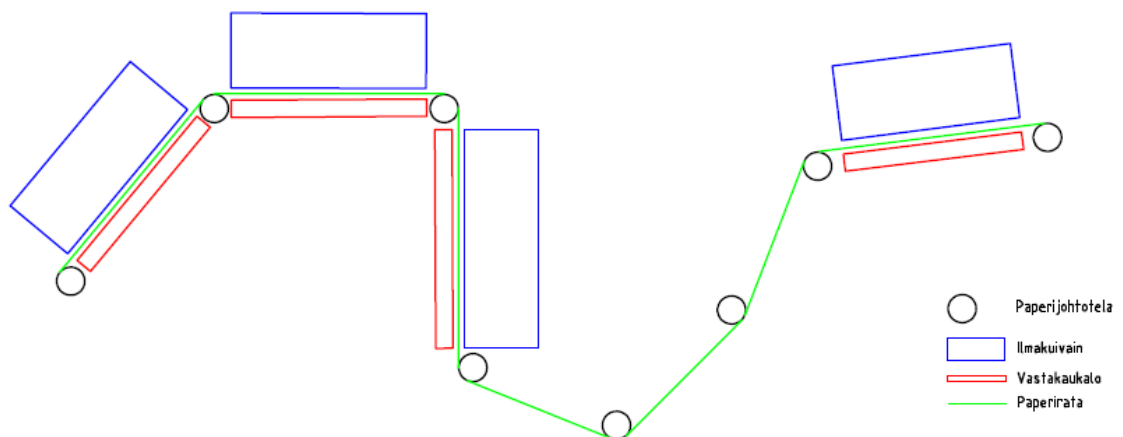
Lämmöntalteenoton hyödyt eivät rajoitu pelkästään energiansäästöhyötyihin, vaan sen avulla saadaan vähennettyä muun muassa kosteutta ja kondensaatiota. Nämä voivat aiheuttaa työntekijöiden terveysongelmia ja vaikuttaa ajan mittaa heikentävästi laitoksen seiniin ja rakenteisiin, jos ne joutuvat alttiiksi ylimääräiselle kosteudelle. (The Renewable Energy Hub, 2018)

Poistoilman lämpötila on yksi keskeisistä tekijöistä kun määritellään lämmön talteenoton toteuttamiskelpoisuutta, sillä lämpötilat voivat vaihdella merkittävästi. Lämmönsiirron ja lämmön talteenoton mahdollistamiseksi onkin välttämätöntä, että poistoilman lämpötila on korkeampi kuin tuloilman. Lämpötilaeron suuruus on tärkeä tekijä lämmön hyödyntämisen ja laadun kannalta. Kyseinen lämpötilaero vaikuttaa muun muassa nopeuteen, jolla lämpöä on mahdollista siirtää ja maksimaaliseen teoreettiseen tehokkuuteen kun lämpöä muunnetaan toiseen energiamuotoon. (U.S. Department of Energy, 2008, 6-7.)

5 PROJEKTI A

5.1 Tuotteen tarkoitus ja toiminta

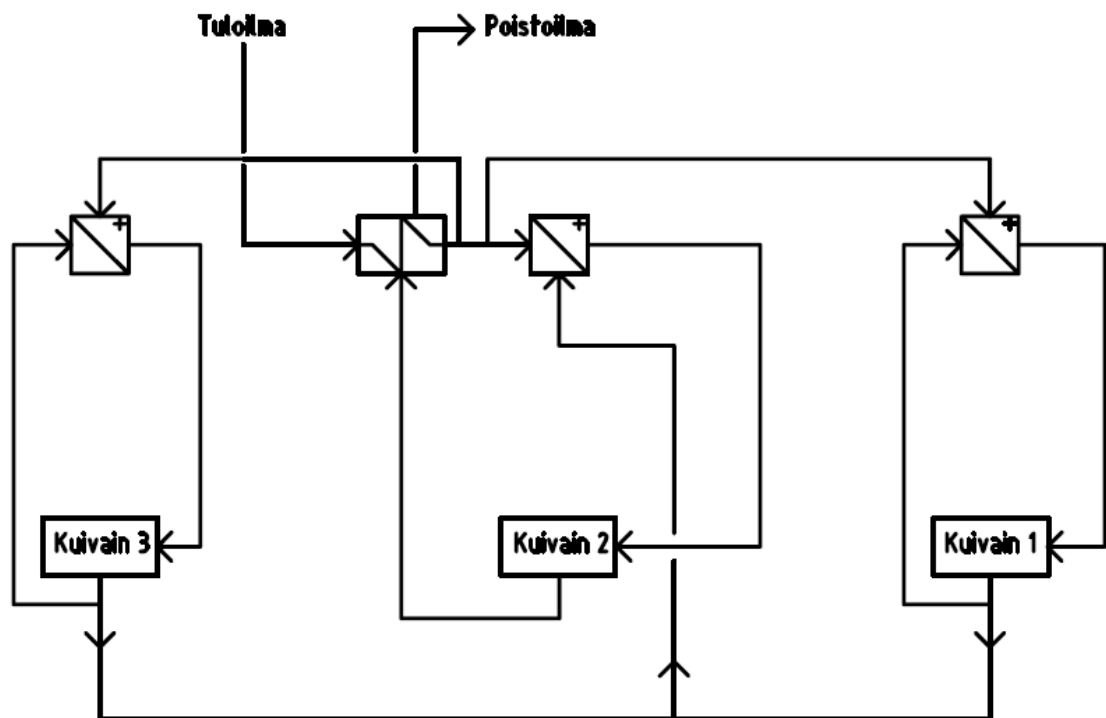
Vastakaukalo on laite, joka asennetaan vastapäätä ilmakuivainta (Kuva 7). Kuten aiemmin mainittuna (ks. luku 1), vastakaukalon tarkoituksena on prosessimielessä ensisijaisesti hyötysuhteen parantaminen. Vastakaukalo mahdollistaa normaalisti häviöksi muodostuvan ilmamäärän talteenoton, mikä puolestaan voidaan hyödyntää sekundäärienergian muodossa hyödyksi uudestaan prosessissa (Kuva 8). Näin toimimalla saavutetaan parempi energiatehokkuus sekä itse prosessissa että myös konetasolla. Kehitettyjen vastakaukaloiden ensiasennus ja testaus toteutettiin projekti A:ssa Espanjassa vuonna 2017. Ilmakuivaimia on laitoksessa yhteensä kuusi asennettuna kahdella asemalla.



Kuva 7 Yksinkertaistettu kuva vastakaukaloiden sijainnista

Normaalitilanteessa yksipuoleisen ilmakuivaimen kautta puhallettavasta ilmamäärästä suurin osa saadaan hyödynnettyä uudelleen kierrättämällä se takaisin prosessiin suuttimien välissä olevien reikälevyjen kautta. Vastakaukalon ansiosta tämä hyötysuhde paranee huomattavasti, ja ilmaa saadaan hyödynnettyä enemmän.

Hyödyntämällä normaalisti häviöksi päätyvän ilmamäärän saavutetaan energiatekniikan kannalta hyötysuhteen paranemisen lisäksi myös muita positiivisia vaikutuksia. Yksi merkittävimmistä on konesalin lämpö- ja kosteuskuormaksi päätyvän ilman ja sen kautta syntyvien haittavaikutuksien väheneminen. Näitä ovat muun muassa kosteus ja kondensaatio, jotka voivat terveysongelmien lisäksi vaikuttaa negatiivisesti ympäröiviin seiniin ja rakenteisiin. Liiallinen kosteus heikentää rakenteita ja voi pahimmassa tapauksessa johtaa homeen muodostumiseen. Liian kostea sisäilma voi aiheuttaa myös muita terveysongelmia. (The Renewable Energy Hub, 2018)

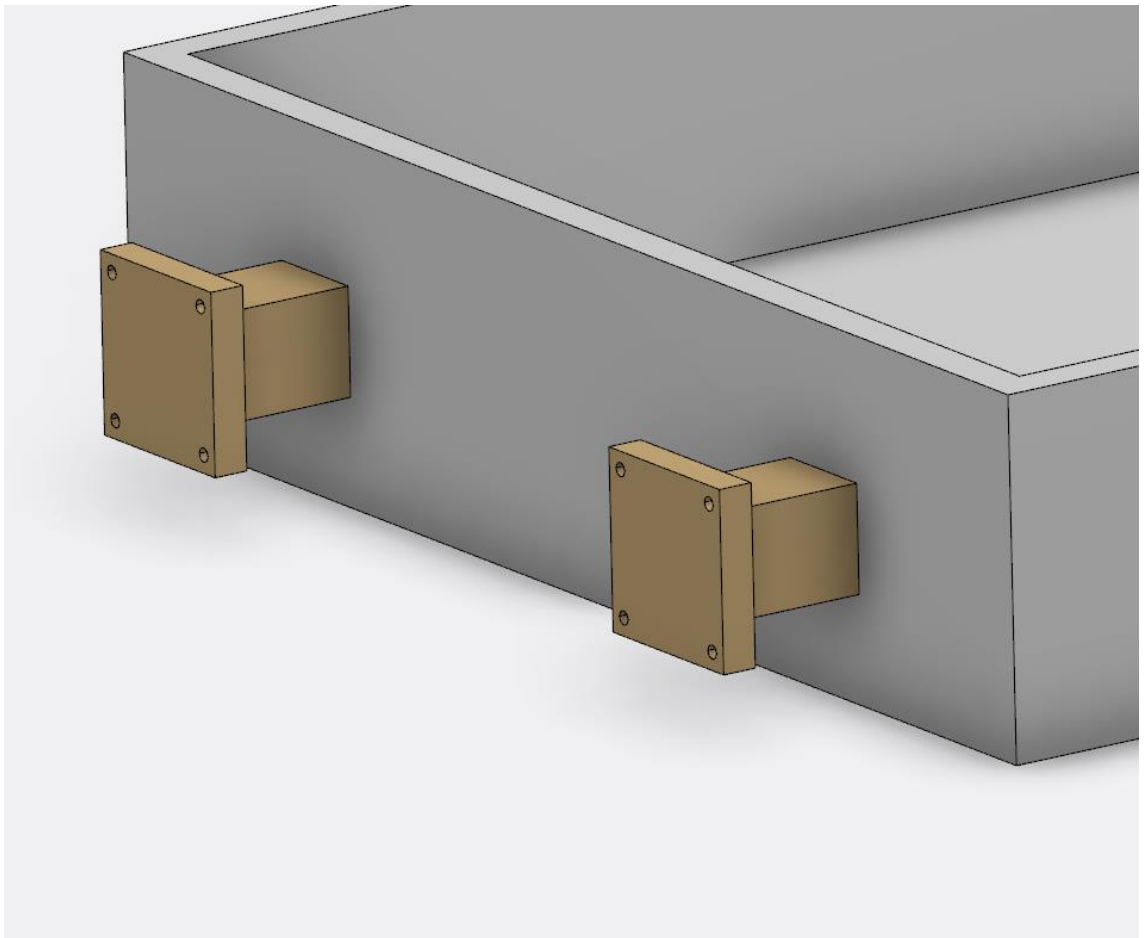


Kuva 8 Yksinkertaistettu PI-kaavio

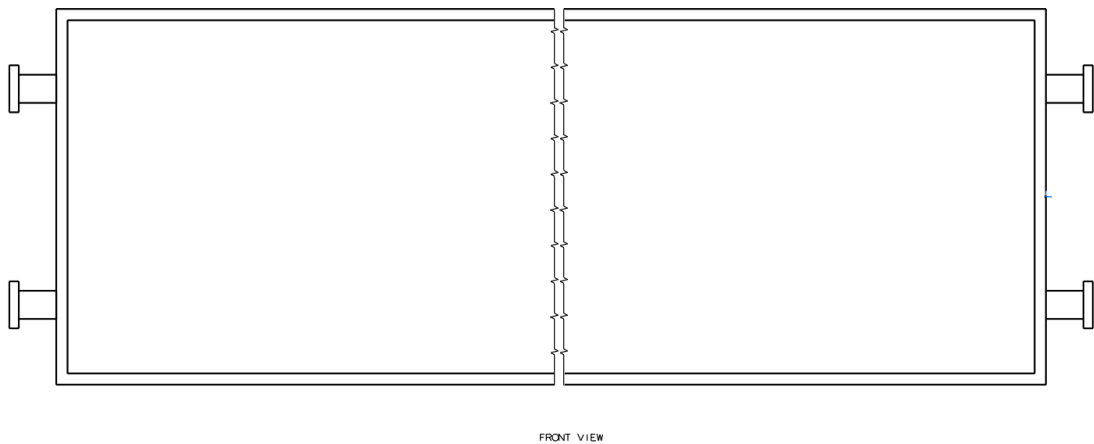
5.2 Nykyinen rakenne ja käytetyt materiaalit

Vastakaukalon rakenne koostuu sisemmästä tukirakenteesta, eristysvillasta ja ulkokuorena toimivasta levyrakenteesta. Sisempi tukirakenne on valmistettu suorakaiderakenneputkesta, eristysnä toimii palamaton mineraalivilla ja levyrakenteessa on käytetty kuumavalssattua rakenneterästä sekä ruostumatonta terästä.

Käyttö- ja hoitopuolella on lisäksi kannatinlaitteet (Kuva 9 & Kuva 10), joilla vastakaukalo tuetaan paikalleen ilmakeivaimen alle. Kannatinlaitteiden kanssa on käytetty myös samoja materiaaleja kuin levyrakenteessa (Kuva 11), näistä selvitys alempana.



Kuva 9 Yksinkertaistettu kuva kannatinlaitteista 1/2



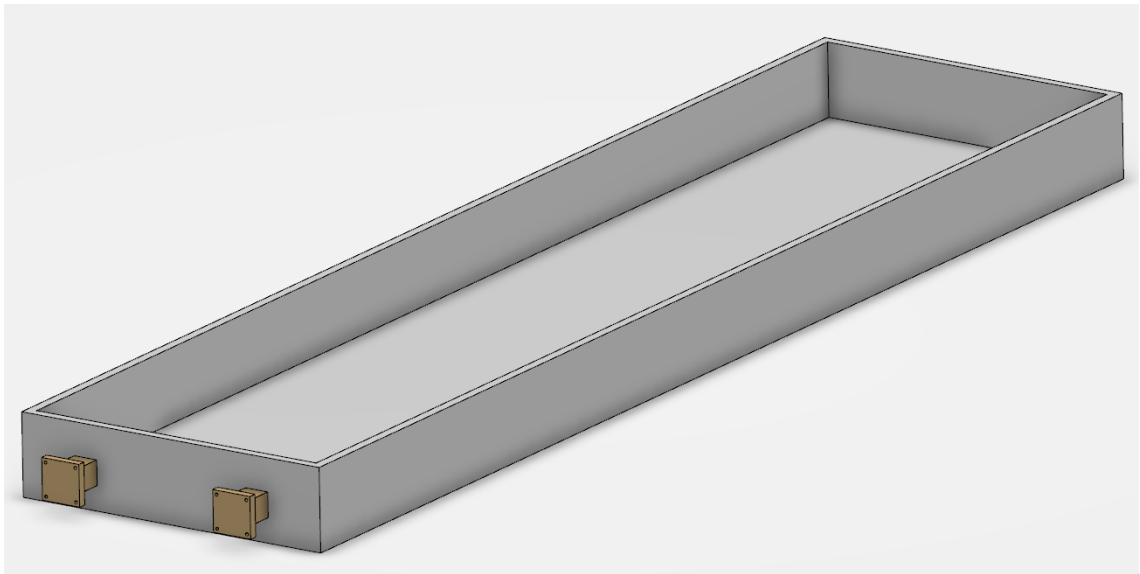
Kuva 10 Yksinkertaistettu kuva kannatinlaitteista 2/2

Projektissa A vastakaukaloita asennettiin yhteensä kuusi, kolme kummallekin asemalle. Koska kaikissa vastakaukaloissa on käytetty samoja materiaaleja, otan tässä kappaleessa tarkasteluun ensimmäisessä asemassa olevan High Intensity -ilmakuivaimen yhteyteen asennetun vastakaukalon.

Suorakaiderakenneputkesta valmistetussa sisemmässä tukirakenteessa on käytetty EN 10219-1 -standardissa määriteltyä hiiliterästä. Tämä eurooppalaisen standardin osa määrittelee tekniset toimitusehdot kylmämuovatuille ja hitsatuille pyöreille, neliön tai suorakaiteen muotoisille rakenneputkille, joita ei ole lämpökäsitelty kylmämuovauksen jälkeen. (Standardit ja julkaisut, SFS EN 10219-1, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.)

Levyrakenteessa on käytetty EN 10025-2/EN 10204-2.2 -standardeissa määriteltyjä hiiliteräksiä sekä EN 10088-2/EN 10204-2.2 -standardeissa määriteltyä hiiliterästä (Kuva 13). Standardissa EN 10025-2 määritellään yleisien teknisien toimitusehtoihin liittyvien vaatimusten lisäksi kuumavalssattujen seostamattomien laatuterästen tekniset toimitusehdot levytuotteille ja pitkille tuotteille sekä puolivalmisteille, joista valmistetaan levytuotteita tai muita pitkiä tuotteita.

Eurooppalaisen EN 10025 -standardin mukaiset teräkset on tarkoitettu käytettäviksi hitsatuissa, pultatuissa ja niitatuissa rakenteissa. Kyseisessä standardissa määritellään lisäksi kolmen eri koneteräksen kemialliset koostumukset ja mekaaniset ominaisuudet. Toimitustilassa +N toimitetut teräkset voidaan kuumamuovata ja/tai normalisoida toimituksen jälkeen. (Standardit ja julkaisut, SFS EN 10025-2, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.)



Kuva 11 Yksinkertaistettu kuva vastakaukalosta

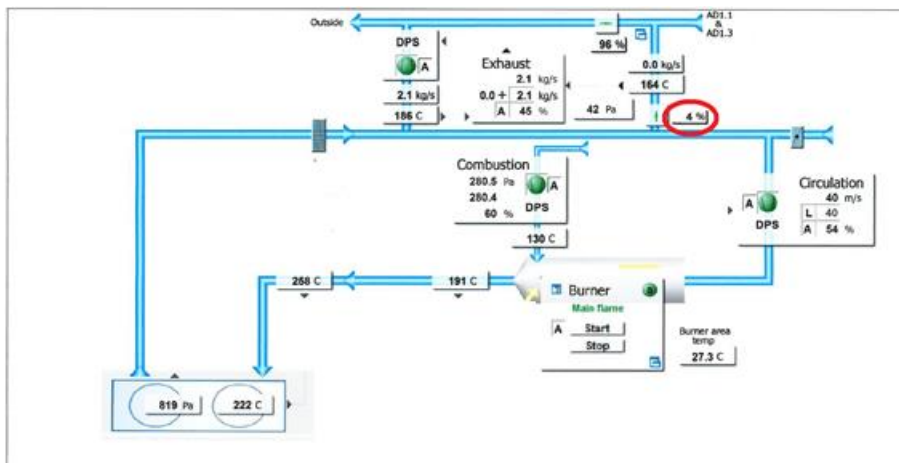
EN 10088-2 -standardissa määritellään tekniset toimitusehdot yleiseen käyttöön tarkoitetuille kuuma- tai kylmävalssatuille korroosionkestäville ruostumattomille standardi- ja erikoisteräslevyille sekä -nauhoille. EN 10204 -standardissa puolestaan määritellään kaikkien metallituotteiden, kuten levyjen, arkkien, tankojen, takeiden ja valujen toimituksen yhteydessä ostajalle sopimuksen mukaisesti toimitettavien aineodistusten eri tyypit valmistustavasta riippumatta. (Standardit ja julkaisut, SFS EN 10088-2; SFS EN 10204, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.)

5.3 Energiansäästö ja kustannukset

Projektissa käytettyjen ilmakeivaimien hyötysuhteeseen vaikuttavat suutinteknologian ja kuivatusilman prosessiparametrien lisäksi pääosin kaksi asiaa: projektin kohteena oleva vastakaukalo ja itse ilmakeivaimien kautta saatavan poistoilman hyödyntäminen prosessissa sekundäärienergiana. Poistoilman hyödyntäminen toteutettiin ohjaamalla ja sekoittamalla ilmakeivaimien AD1 ja AD3 poistoilma ilmakeivaimen AD2 tuloilmaan.

Näin ilmakeivaimen AD2 lämpötilaa voidaan mahdollisesti laskea, sillä normaalin, noin 35 °C tuloilman sijaan voitaisiin ilmakeivaimen ilmanoton kanssa käyttää lisäksi keskiarvolta noin 160 °C ilmaa sekundäärienergiana.

Prosessimielessä kuumempi ilma edesauttaa ilmakeivaimen hyötysuhdetta merkittävästi, mutta kuivatuslaitteiston mitoitusohjelmalla tehdyn simuloidun laskelman perusteella korvausilmaa käytettiin kyseisen laitoksen projektikohteessa hyödyksi vain noin 0,14 kg/s (Liite 1). Tällä ilmamäärällä alkuperäistä kuumemman korvausilman käyttö vaikuttaa siis kuitenkin vain vähän itse polttimen energiankulutukseen, ja korvausilmasäleikkö olikin vain noin 4 % auki (Kuva 12). Prosessimielessä on siis ilmeisesti todettu, ettei suuremmalle korvausilmamäärälle ei ole välttämättä tarvetta kyseisessä kohteessa.



Kuva 12 Korvausilmapellin aukiolo

Kun kyseistä kuumaa korvausilmaa tuodaan kuitenkin edellä mainitun 0,14 kg/s verran AD1- ja AD3-ilmakuivaimilta AD2-ilmakuivaimelle, sen kaasupolttimen energiankulutus laskee alkuperäisestä 2507,1 kWh (Kuva 13) lukemaan 2478,6 kWh (Kuva 14). Tämän seurauksena ilmakeivaimien yhteenlaskettu hyötysuhde kasvaa noin 0,2 % ja tämän ansiosta energiankulutus laskee siis yhteensä 28,5 kWh verran (Kuva 14). Ottaen huomioon kuinka paljon korvausilmaa käytetään hyödyksi kohteessa, on tämä lukema erittäin hyvä. Suuremmalla mittakaavalla voitaisiin saavuttaa vieläkin paremmat energiansäästöhyödyt.

Laskelmat	Gas consumption (nm ³ /h)	Energy consumption (kW)
Mittauspiste 1	261,2	2583,2
Mittauspiste 2	253,5	2507,1
Mittauspiste 3	233,8	2312
Yhteensä	748,5	7402,3
Hyötysuhde	71,4 %	

Kuva 13 Alkuperäinen teoreettinen energiankulutus ja hyötysuhde

Laskelmat	Gas consumption (nm ³ /h)	Energy consumption (kW)
Mittauspiste 1	261,2	2583,2
Mittauspiste 2	250,6	2478,6
Mittauspiste 3	233,8	2312
Yhteensä	745,6	7373,8
Hyötysuhde	71,6 %	

Kuva 14 Korvausilman avulla saavutettu teoreettinen energiankulutus ja hyötysuhde

Yhden aseman teoreettiseksi energiankulutukseksi laskettiin mittauksien perusteella 7402,3 kWh. Tästä määrästä 5282 kWh pystytään käyttämään itse paperin kuivaamiseen. Teoreettiseksi hyötysuhteeksi syntyykin siis täten 71,4 %, mikä on jo itsessään hyvä lukema. Paikan päällä tehtyjen mittauksien pohjalta hyötysuhteen todettiin kuitenkin olevan reilusti parempi, noin 79,6 %. Tämä johtui energiankulutuksen muutoksesta, mikä olikin huomattavasti oletettua parempi, 6636 kWh (Kuva 15).

Lämpötilojen myös oletettiin olevan vastakaukalon sisällä noin 80 °C, mutta keskiarvo olikin kaksinkertainen tästä, noin 160 °C (Kuva 16). Tällä oli myös positiivinen vaikutus tuloksiin.

Laskelmat	Gas consumption (nm3/h)	Energy consumption (kW)	Eff heat value (MJ/nm3)	Drying Energy to web	375 °C & 65 m/s
Mittauspiste 1	261,2	2583,2	35,6		1927
Mittauspiste 2	253,5	2507,1	35,6		1828
Mittauspiste 3	233,8	2312	35,6		1527
Yhteensä	748,5	7402,3			5282
Hyötysuhde	71,4 %				
Laskelmat					
	Gas consumption (nm3/h)	Energy consumption (kW)	Eff heat value (MJ/nm3)	375 °C & 65 m/s	
L1+L2+L3 max	624	7216	41,6		
L1+L2+L3 average	574	6636	41,6		
Hyötysuhde	79,6 %				

Kuva 15. Energiankulutus

IR mittaukset radan lämpötilasta	
L1 ennen	31,3 °C
L1 jälkeen	59,6 °C
L2 ennen	51,1 °C
L2 jälkeen	63,3 °C
L3 ennen	61,9 °C
L3 jälkeen	62,1 °C
L5 ennen	45,8 °C
L5 jälkeen	59,5 °C
L6 ennen	59,5 °C
L6 jälkeen	60,8 °C
Lämpötilat kourun sisältä	
L2	158 °C
L3	120 °C
L4	144 °C
L5	155 °C
L6	160-200 °C

Kuva 16 Mitatut lämpötilat vastakaukalon sisältä

5.4 Todetut kehitystarpeet

Riippumatta hyvistä tuloksista on vastakaukaloiden kanssa todettu selviä kehitystarpeita. Nykyinen rakenne, vaikkakin rakenteeltaan tukeva, on kustannusmielessä selkeä kehityskohde. Pienikokoisien, pituudeltaan alle neljän metrin ilmakeivaimien yhteydessä on helpompaa käyttää samankokoista vastakaukaloa kuin ilmakeivain itse.

Kun kyseessä on suurikokoinen ilmakeivain, on kustannustehokkaampaa asentaa ilmakeivaimen alle kaksi pienikokoisempaa vastakaukaloa kumpaankin reunaan. Ilmavirtaa ei juuri karkaa konesaliympäristöön ilmakeivaimen keskeltä, sillä paperirata estää tämän. Ilmakeivaimen ja paperiradan reunoilla oleva ilmavirran karkaaminen on vastakaukalon kannalta keskeinen asia, ja sen estämiseen vastakaukalo on ensisijaisesti kehitettykin.

Rakenteensa vuoksi kaukalo on myös hankala asentaa kohteessa paikalleen ja sen tukeminen tuottaa haasteita vastakaukalon suuren omamassan vuoksi. Ensiprojektiin toteutettu rakenne oli alun perin tarkoitettu alle 4 m ilmakeivaimille, mutta projektissa sitä päädyttiin käyttämään yli 8 m ilmakeivaimille.

Myös asiakkaan kannalta mahdollisimman kustannustehokas ratkaisu olisi hyödyllinen. Tämän pohjalta isoille ilmakeivaimille olisi hyvä kehittää kooltaan pienemmät reunavastakaukalot, joiden avulla saataisiin sama, ellei parempi tulos kuin referenssiprototyypin kanssa aikaansaadut energiansäästöhyödyt.

6 VASTAKAUKALON KEHITYS YLI 4 M KONEILLE

6.1 Rakenne

Lähtökohtaisesti vastakaukalon olisi hyvä olla mahdollisimman pienikokoinen ja samalla sen tulisi saavuttaa mahdollisimman hyvä energiatehokkuus. Näin sekä tuotannon että asennuksen kustannuksissa onnistuttaisiin saavuttamaan säästöjä. Tällä on puolestaan suora vaikutus takaisinmaksu-aikaan, mikä on asiakkaan kannalta yksi olennaisista asioista.

Pienemmän koon vuoksi materiaalien määrässä voidaan saavuttaa säästöjä, sillä tukirakenteessa voidaan valmistaa ensisijaisesti alkuperäistä kevyempi. Tästä seurauksena suorakaiderakenneputkea voidaan käyttää vähemmän, jos kyseistä tukirakenneratkaisua käytetään uudestaan. Samalla myös ulkokuorena toimivassa levyrakenteessa saavutetaan materiaalisäästöjä.

Kevyempi rakenne mahdollistaa myös helpomman asennuksen ja reunalaatikon tukemisen paikalleen. Lisäksi tuotteen kuljetukseen liittyviä kuluja saadaan vähennettyä, sillä pienemmän koon vuoksi tuotetta on helpompi kuljettaa ja se ei välttämättä vaadi erikoiskuljetusta.

6.2 Materiaali

Materiaalivalintoihin vaikuttaa muun muassa toimintaympäristön lämpötila ja kosteus, paperiradan kuivauksessa käytettävän ilman lämpötila ja vastakaukalon rakenne sekä itse käyttötarkoitus. Materiaalivalinnassa täytyy ottaa myös huomioon muun muassa:

- liitostavat (toksaaminen, pulttikiinnitys, hitsaaminen)
- hitsausominaisuudet
- lämpölaajeneminen.

Realistisesti ajateltuna materiaalivalinnat voidaan tiivistää kolmeen eri vaihtoehtoon, kun huomioon otetaan edellä mainitut asiat ja vastakaukalon käyttötarkoitus. Rajauksen kohteeksi muodostuvat säänkestävä ja ferriittinen teräs sekä ruostumattomat teräkset. Kyseisillä materiaaleilla on erilaiset ominaisuudet, ja valinta tulee tehdä käyttötarkoituksen ja toimintaympäristön mukaan.

6.2.1 Säänkestävä teräs

Säänkestävä teräs, toiselta nimeltään myös COR-TEN (lyhennetty sanoista corrosion resistance & tensile strength), on matalahiilinen rakenneteräs, johon on valmistuksen yhteydessä lisätty seosaineita. Näitä ovat kupari, kromi, nikkeli ja fosfori. Seosaineiden avulla teräksen pintaan muodostuu yhdessä hapen ja kosteuden kanssa sääolosuhteilta suojaava oksidikerros. (Säänkestävät teräkset, Oy Flinkerberg Ab, 2018.)

Tämä suojaava kerros estää korroosion jatkumisen pintaa syvemmillä ja muodostaa teräkselle sen ominaisen, ruskeanoranssin ulkonäön. Kyseinen värimuutos syntyy, kun teräksen pinta altistuu vuorotellen erilaisille sääolosuhteille (kuumuus ja kylmyys). (Säänkestävät teräkset, Oy Flinkerberg Ab, 2018.)

Säänkestävät teräkset kestävät myös savukaasujen aiheuttamaa korroosiota paremmin kuin yleiset rakenneteräkset ja niiden hilseilynkestävyys korkeissa lämpötiloissa on parempi. (Rautaruukin terästuotteet, Suunnittelijan opas, Rautaruukki, 2000).

Pinnan vaurioituessa tiivis oksidikerros korjaa itse itsensä, ja suojakerroksen muodostuminen tapahtuu tavallisissa sääoloissa noin 18–36 kuukauden sisällä. (Säänkestävät teräkset, Oy Flinkerberg Ab, 2018.)

Säänkestävä teräs voidaan jakaa useaan eri tyyppiin: Corten A, Corten AF, Corten B ja Corten High Temp. Corten A on teräs, jota käytetään tyypillisesti mm. arkkitehtuuriin liittyvissä kohteissa, säiliöissä, savupiipuissa, suojapaneeleissa ja lämmönvaihtimissa. Se on fosforipitoisempaa ja kestää parhaiten ilmakorroosiota, joten se soveltuu parhaiten ohuisiin teräsrakenteisiin. Sillä on myös etu rikki-pitoisissa teollisuusilmastossa. (Rautaruukin terästuotteet, Suunnittelijan opas, Rautaruukki, 2000).

Corten AF on paremmin kylmämuovaukseen kehitetty teräslaji. Sen parempi särmättävyys perustuu rikki-pitoisuuden ja epämetallisten sulkeumien muotokontrolliin. (Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa, Rautaruukki, 2000).

Corten B soveltuu paremman iskutheydensä ja hyvän hitsattavuutensa ansiosta varsinkin lujuutta vaativiin kohteisiin, kuten kantaviin teräsrakenteisiin. (Rautaruukin terästuotteet, Suunnittelijan opas, Rautaruukki, 2000).

Corten High Temp puolestaan on paremmin korkeisiin käyttölämpötiloihin soveltuva teräslaji. Sen hilseilykestävyyttä on parannettu tavallista Corten A -terästä korkeammalla kromipitoisuudella ja virumiskestävyyttä on parannettu vanadiiniseostuksella. (Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa, Rautaruukki, 2000).

6.2.2 Ferriittinen teräs (musta teräs)

Ferriittinen teräs on tärkein käyttömetalli, ja sen mekaanisia ominaisuuksia on mahdollista säätää koostumuksen ja valmistusprosessin avulla. Teräksen ja raudan ero on hiilipitoisuudessa (teräs = hiilipitoisuus alle 1,7 %). Hiilipitoisuuden vaikutus teräksen ominaisuuksiin on ratkaisevassa asemassa, ja teräkset voidaankin luokitella pitoisuuden mukaan seuraavasti:

- matalahiiliset (pitoisuus alle 0,05 %)
- niukkaahiiliset (pitoisuus alle 0,25 %)
- keskihiiliset (pitoisuus alle 0,60 %)
- runsashiiliset (pitoisuus alle 1,70 %).

Puhtaan raudan (Fe) sulamispiste on noin 1530 °C ja tiheys 7,85 g/cm³. Runsaammin seostettujen ruostumattomien terästen sulamispiste on 50...100 °C alhaisempi

6.2.3 Ruostumattomat teräkset

Ruostumaton teräs on yleisnimitys teräksille, jotka sisältävät vähintään 10 % ja useimmiten enemmän kuin 12 % kromia. Kromin lisäyksen ansiosta ruostumattomat teräkset kestävät muun muassa kostean ilman ja hapettuneen veden aiheuttamaa korroosiota. Ruostumattoman teräksen pintaan muodostuu erittäin ohut, suojaava pintakerros. Tämä suojakerros on kromioksidia, ja se muodostuu sen altistuessa ilmalle. Kromin lisäksi ruostumattomia teräksiä seostetaan yleisimmin joko nikkelillä tai molybdeenillä, sekä pienissä määrin ruostumattomaan teräkseen voidaan seostaa myös kuparia, typpeä tai titaania.

Yleisesti ottaen teräksen korroosionkestävyys kasvaa kromi-, molybdeeni- ja typpipitoisuuden myötä. Kun terästä seostetaan runsaasti eri seosaineilla, se kestää myös aggressiivisempien kemikaalien, kuten happojen, syövytystä. Lisäksi myös vaativien olosuhteiden, kuten suolaveden, syövyttävä vaikutus vähenee. (Ruostumattomat teräkset, Tibnor Oy, 2018)

Ferriittinen ruostumaton teräs (toiselta nimeltään kromiteräs) sisältää tavallisesti noin 12-25% kromia. Joissain tapauksissa teräkseen on sisällytetty myös molybdeeni- tai titaanilisiä. Kromiteräksillä on hyvä korroosionsuoja, mutta melko pehmeä teräslaji. Tästä johtuen niiden mekaaniset ominaisuudet ovat samankaltaiset kuin tavallisella niukkahiilisellä teräksellä. Ne ovat magneettisia ja niitä on myös helppo hitsata. (Ruostumattomat teräkset, Tibnor Oy, 2018)

Ferriittis-austeniittinen ruostumattomat teräkset ovat runsasseosteisia ja magneettisia. Niitä kutsutaan myös duplex-teräksiksi ja niillä on hyvä lujuus ja korroosio-ominaisuudet, mutta niitä ei voi karkaista. (Ruostumattomat teräkset, Tibnor Oy, 2018)

Austeniittinen ruostumaton teräs eli haponkestävä ruostumaton teräs puolestaan sisältää kromin lisäksi tavallisesti vähintään 8% nikkeliä. Molybdeeniä, typpeä ja joskus myös kuparia ja titaania voidaan käyttää seosaineina, kun kyseessä on parempi teräslaatu. Kyseessä on normaalisti epämagneettinen teräs, mutta työstämällä siitä saadaan magneettista. Korroosionsuoja riippuu sidosaineista ja sitä voidaan käyttää kohteissa, joissa se altistuu korkeille lämpötiloille. Hitsausominaisuudet ovat hyvät, mutta duplex-teräksien lailla sitä ei voida karkaista. (Ruostumattomat teräkset, Tibnor Oy, 2018)

6.3 Ratasäätö

Ratasäätöön liittyy monia haasteita ja kysymyksiä. Keskeisin haaste on saavuttaa riittävä ratasäätö paperirataan nähden. Kuten aiemmin mainittuna, ilmakeivaimen suuttimien kautta tulevan ilmavirran johdosta paperiradan profiili muuttuu kuperaksi. Sama tapahtuu myös paperiradan pääviennin kanssa, eli silloin, kun paperirata viedään ensimmäistä kertaa koneen läpi.

Ratasäädön avulla mahdolliset ilmavuodot voitaisiin minimoida. Tähän liittyy kuitenkin ongelmia, joista isoin on säädön tekeminen silloin, kun kone on tuotantovaiheessa. Nykyaikaisten turvamääräysten vuoksi valmiissa tehdasympäristössä ilmakeivaimen ja vastakaukaloon on hankala päästä käsiksi. Rakenteet on suojattu mm. erilaisilla turvakehikoilla, joiden avulla mahdolliset tapaturmatilanteet voidaan estää. Tämä kuitenkin tekee säätämisen haasteelliseksi, sillä säädettävät osat saattavat usein olla korkealla.

Ratasäätöön liittyen yksi mahdollisuus on jättää sisempi päätylevy pois vastakaukalosta, mutta kysymykseksi jää, kuinka paljon tämä vaikuttaa ilmavirran käyttäytymiseen, ja millainen energiatehokkuus vastakaukalolla tällöin olisi. Toinen mahdollisuus on alipaine. Jos sisempi seinämä jätetään vastakaukalosta pois, estäisikö vastakaukalossa syntyvä alipaine mahdollisen ilmavirran karkaamisen?

6.4 Vastakaukalon muoto

Yhtenä tärkeimmistä haasteista reunavastakaukalon muodon suunnittelussa on huomioida radan etäisyys vastakaukalosta. Kuten edellä mainittuna, radan käyttäytymisen vuoksi vastakaukalon muodot eivät saa aiheuttaa ongelmia tai vaurioita paperirataan missään tapauksessa. Lisäksi mahdollisen säädön mahdollisuus tulisi ottaa huomioon lopullista versiota suunnitellessa. Vastakaukalon muodon tulisi edesauttaa vastakaukalon sisälle kulkeutuvien ilmavirtojen käyttäytymistä siten, että ne saataisiin palautettua mahdollisimman tehokkaasti ilmakehän poistokanavaan, ja sitä kautta takaisin prosessiin käytettäväksi sekundäärienergiana. Näin ilmakehän sekä koko prosessilinjan kokonaisenergiatehokkuutta saataisiin parannettua, ja normaalisti häviöksi muodostuvat ilmavirrat saataisiin käytettyä hyödyksi.

Tässä opinnäytetyössä vastakaukalon rakenteen suunnittelussa käytettiin Catia V5- ja -V6- ohjelmistoja. Vastakaukalosta tehtiin ensimmäisenä yksinkertainen malli, ja siihen yhdistettiin lisäksi oikea malli käytetystä ilmakehän poistokanavasta, jotta virtausmallinnuksessa saataisiin mahdollisuuksien mukaan kattava data siitä, miten ilmavirrat voisivat käyttäytyä vastakaukalon sisällä.

Tämän jälkeen saatu 3D-malli ladattiin COMSOL Multiphysics -simulointiohjelmistoon, jossa malliin lisättiin myös paperirataa simuloiva mallinnus. Mallin verkottamisen ja ohjelmoinnin jälkeen voitiin luoda ilmavirtaus kappaleeseen käyttäen hyödyksi K- ϵ (epsilon) -ohjelmistoa, joka teki laskelmat perustuen mallin verkkoon ja reunaehtoihin.

Kyseinen ohjelma on karkea, teollisuudessa käytetty turbulenssimallinnus, jonka avulla päästään mahdolliseen alkutilanteeseen mallin kanssa. Se on siis kokonaisuudessaan lähinnä suuntaa antava, eikä välttämättä kuvasta oikeaa tilannetta. Laajemmat virtausmallinnukseen käytettävät ohjelmistot vaativat tarkemman ja yksityiskohtaisemman lähestymistavan ja laskelmoinnin, mikä ei ollut tässä työssä ensisijaisena tarkoituksena.

Tämän pohjalta saatiin kuitenkin siis teoreettinen näkymä siitä, miten ilmavirrat saattaisivat käyttäytyä vastakaukalon sisällä, ja miten vastakaukalon muoto saattaisi niihin vaikuttaa. Lisäksi ohjelman kautta saatiin selville mahdolliset virtausnopeudet ja painevaihtelut. Virtausmallinnuksissa ilmavirtaukset ovat näkyvissä valkoisin viivoin. Paineenvaihteluita sekä paine-eroja ei juuri ollut mallien välillä tai ne olivat minimaaliset. Suurimmat paineet ilmenevät suuttimien keskiosissa.

Virtausnopeudet olivat kuitenkin suhteellisen matalat, noin 2–3 m/s, ja tästä johtuen joissain malleissa ei juuri esiintynyt selkeää kuviota ilmavirran käyttäytymistä. Ilmavirran nopeuden laskiessa myös sen käyttäytyminen on satunnaista, eikä sille tämän takia välttämättä löydy selkeää, yksittäistä kulkureittiä mallien sisällä. Tästä hyvänä esimerkkinä alempana oleva malli 2 (Liite 1), jossa valkoisilla viivoilla kuvatut ilmavirtauksen kulkusuunnat ja käyttäytyminen ovat erittäin satunnaisia. Tulosten jälkeen ensimmäistä mallia muokattiin pienillä muutoksilla ja tämän jälkeen siitä tehtiin kaksi kokonaan uutta versiota. Yhteensä malliversioita tehtiin alkuvaiheessa kuusi kappaletta.

6.4.1 Malli 1

Ensimmäisenä mallina toimi yksinkertainen, suorakulmainen kourumalli, jossa oli avoin sisäpääty (Liite 1). Kyseistä mallia käytettiin lähtökohtana, sillä se oli lähimpänä jo toteutettua projekti A:ta. Virtausmallinnuksessa ilmeni suhteellisen selkeä ja odotettu ilmavirran käyttäytyminen (Liite 1). Vaikka osa ilmavirrasta palautuukin kiertoon, osa siitä pakenee ulos vastakaukalosta avoimen sisäseinämän vuoksi.

6.4.2 Malli 1 päätylevyllä

Seuraava mietitty muutos oli käyttää osittaista levyä vastakaukalon sisemmässä päädyssä (Liite 1). Tämän tarkoituksena oli nähdä, kuinka paljon sillä olisi vaikutusta ilmavirran käyttäytymiseen. Päätylevyn avulla ilmavirtauksen käyttäytymiseen tuli näkyviä muutoksia, ja sitä ei karkaa ulos ensimmäiseen versioon verrattuna läheskään yhtä paljon. Kuitenkin on mahdollista, että osa ilmavirrasta pääsee yhä pakenemaan vastakaukalon avoimesta yläkulmasta. Ensimmäiseen malliin verrattuna ilmavirtojen käyttäytyminen olisi kuitenkin kokonaisuudessaan yhtenäisempää ja ilmavirtojen kierto olisi näin myös parempaa mallin sisällä.

6.4.3 Malli 2

Seuraava muutos oli madaltaa vastakaukaloa noin puolet ensimmäiseen malliin verrattuna (Liite 1). Tämän avulla haluttiin saada mahdollista tietoa siitä, miten vastakaukalon sisäkorkeus vaikuttaisi ilmavirtojen käyttäytymiseen. Kuten edellä mainittuna, matalan virtausnopeuden vuoksi ilmavirtojen kanssa ei kuitenkaan esiinny selkeää käyttäytymistä, vaan virrat poukkoilevat vastakaukalon sisällä erittäin satunnaisesti. (Liite 1).

6.4.4 Malli 2 päätylevyllä

Kuten ensimmäisen mallin kanssa, myös tähän testattiin osittaista sisäpäätyä. Toisin kuin ensimmäisen mallin kanssa, päätylevyllä olikin ilmavirtoihin negatiivinen vaikutus. Seinämän takia vastakaukalon keskelle syntyi turbulenttinen pyörre (Liite 1). Kyseinen turbulenttinen ilmavirtojen käyttäytyminen saattaisi toiminnassa häiritä radan kulkua, tai tuottaa siihen laatuongelmia.

6.4.5 Malli 3

Kolmannen mallin kanssa pohdittiin täysin edellisistä poikkeavaa ratkaisua. Tuloksena syntyi niin sanottu 'downforce'-malli (Liite 1). Mallin tarkoituksena on mahdollistaa ilmavirran kulku paperiradan kulkusuunnan mukaisesti. Tämän ratkaisun ansiosta ilmavirtaa ei karkaa ilmakeivaimen/vastakaukalon reunoilta, vaan se kulkeutuu mallin muotojen ansiosta syntyvän ilmapatjan mukana eteenpäin johdonmukaisesti paperiradan kulkusuunnan mukaan.

Ilmavirran kulku voitaisiin hyödyntää tämän jälkeen mahdollistamalla ilmavirran kulku ohjaamalla se poistokanavaan, tai lisäämällä ilmakeivaimen reuna-alueilla tapahtuvaa imua, jotta ilmavirta saadaan hyödynnettyä uudelleen prosessissa sekundäärienergiana. Mallin profiili on selkeä ja yksinkertaisuutensa vuoksi myös helppo valmistaa (Liite 1). Tämän johdosta rakenne- ja valmistuskustannuksissa voidaan saavuttaa säästöjä, ja vastakaukalon tukeminen paikalleen on myös yksinkertaisempaa. Kevyen rakenteen johdosta vastakaukaloa voitaisiin tarvittaessa myös taivuttaa hieman, jos tälle olisi tarvetta.

Huomattavaa reunavuotoa ei ole havaittavissa downforce-mallisen reunavastakaukalon kanssa (Liite 1). Kyseiseen malliin liittyy kuitenkin myös haasteita ja ongelmia. Isoimpana niistä on ilmavirran päätyminen ilmakehän poistokanavaan, tai sen mahdollistaminen. Vaikka teoriassa kyseinen malli toimisi hyvin, joutuisi ilmakehän rakennetta mahdollisesti muokkaamaan, jotta vastakaukalon hyöty saataisiin optimoituksi. Tämä vaatisi lisäkehitystyötä sekä ilmakehän, että vastakaukalon osalta.

6.4.6 Malli 4

Neljäntenä mallina suunniteltiin muodoiltaan hieman radikaalimpi vastakaukalomalli (Liite 1). Tämän tarkoituksena oli nähdä ilmavirtojen käyttäytyminen ns. ääriesimerkissä. Tuloksia katsellessa ei vastakaukalon sisälle ei syntynyt suuria, negatiivisesti vaikuttavia pyörteitä, ja ilmavirtojen käyttäytyminen on havaittavissa suhteellisen selkeästi (Liite 1). Itse vastakaukalon muoto saattaisi kuitenkin tuottaa ongelmia toiminnassa. Kysymykseksi muodostuu, onko mahdollista, että mallin muoto voisi edesauttaa ilmavirran karkaamista radan ja vastakaukalon kärkeen jäävän raon kautta. Toinen haaste on radan käyttäytyminen vastakaukalon kärjessä.

6.4.7 Malli 5

Mallia numero 1 muutettiin lyhentämällä sen pituutta noin puolet (Liite 1). Virtausnopeus oli sama kuin aikaisempien mallien kanssa (42 m/s). Virtauskaaviota tarkastellessa vaikka ilmavirrat kulkevat ensimmäistä mallia paremmin vastakaukalon sisällä, käyttäytyvät ne edelleen erittäin satunnaisesti, eikä niillä ole yhtenäistä kulkusuuntaa (Liite 1).

6.4.8 Malli 6

Yksi mahdollinen ratkaisu mallin 4 yhteydessä nousseisiin ongelmiin olisi lisätä vastakaukalon mallin kärkeen lyhyt, tasainen levy joka olisi samansuuntainen radan kanssa (Liite 1). Tämän avulla radan ja levyn väliin syntyisi ilmapatja, mikä kulkisi radan mukaisesti. Kyseinen ilmapatja estäisi näin vastakaukalon sisällä olevan ilman karkaamisen vastakaukalon kärjestä.

Vaikka levy voisi toimia teoriassa halutunlaisesti, vaatisi mallin kehitys kuitenkin pilottiprojektin, jossa mallin käyttäytymistä voitaisiin testata oikeissa testiolosuhteissa. Haasteeksi voi edelleen muodostua paperiradan käyttäytyminen lisälevyn kohdalla, ja yhtenä huolenaiheena on mahdollinen radan ja lisälevyn kiinniottaminen. Teoriassa lisälevyn tuoma hyöty kuitenkin edesauttaisi vastakaukalon toimintaa huomattavasti.

Malliin numero 4 tehtiin yhteensä kaksi muutosta, malliin päätyyn lisättiin edellä mainittu levyrakenne, ja vastakaukalon sisällä kulkevaa virtausnopeutta kasvatettiin kaksinkertaiseksi. Mallin parametreja muutettiin siten, että paperiradan reunassa oleva ilmanopeus kasvoi noin 84 m/s edellisen 42 m/s verrattuna.

Virtausmallinnukseen oli kuitenkin vaikea simuloida haluttu lisälevyrakenne, joten mallin päädyistä tehtiin avoin. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma otti huomioon ilmavirtauksen kulkemisen sekä mallin sisään, että sieltä ulos. Tällä haluttiin simuloida lisälevyn tuomaa mahdollista vaikutusta ilmavirtauksen käyttäytymiseen. Kuten virtausmallinnuksesta voidaan huomata, virtausnopeuden kasvun myötä sen käyttäytyminen on edellistä mallia selkeämpää ja virtauksien kanssa ei ole havaittavissa negatiivisia vaikutuksia (Liite 1).

6.5 Jatkokehitys

Jatkokehityksen kohteeksi valittiin malli 6. Kyseinen vastakaukalo tuotti positiivisia tuloksia virtausmallinnuksessa, ja teoriassa vastakaukalon energiatehokkuus paransi myös mallin kärkeen suunnitellun lisälevyn ansiosta vielä entisestään. Yksinkertaisen mallin pohjalta suunniteltiin uusi, yksityiskohtaisempi malli, johon mallinnettiin erikseen sekä tukirakenne, eristyksen että pintapellit (Liite 1). Tämän avulla mallin pohjalta saatiin laskettua arviot materiaalikustannuksista ja siitä, kuinka paljon painoa saataisiin säästettyä verrattuna projektissa A toteutettuun ratkaisuun.

Mallista päädyttiin tekemään kaksi eri versiota, sillä joissain asennuskohteissa vastakaukalon täytyy olla normaalista poikkeava. Tässä tapauksessa kyseessä oli vastakaukalon sivut, joita ei mahdollisesti tarvita tietyissä tilanteissa. Toisen version haasteeksi nousikin juuri sivujen tuoman tuen häviäminen ja se, miten asia kompensoitaisiin mallin rakenteessa. Ensimmäisen mallin tiivistäminen paperirataa vievien telojen välille on helpompaa, sillä vastakaukalo voidaan asentaa telojen alapuolelle, ja sitä kautta tiivistää teloja vasten. Jos sivuja ei voida kuitenkaan asentaa vastakaukaloon, täytyy mallin rakennetta muuttaa varsinkin tilanteissa, joissa ilmakeivain asennetaan siten, että sen reuna on ratajohtotelan puolella välissä. Tässä tilanteessa vastakaukalon pääty joudutaan mahdollisesti valmistamaan hieman kuperaksi kummaltakin puolelta, jotta telojen pyöreä muoto saadaan otettua huomioon ja tiivistys saadaan hoidettua.

Molempien versioiden suunnittelu alkoi tukirakenteen suunnittelulla, tämän jälkeen oli eristyksen vuoro ja lopulta näiden pohjalta mallinnettiin pintamallinnukset. Tavoitteena oli saada mahdollisimman kevyt rakenne, joka olisi myös tukeva. Näin materiaalikustannuksissa saataisiin säästöjä ja vastakaukalon tukeminen paikalleen olisi yksinkertaisempaa vastakaukalon matalamman omamassan ansiosta.

Vähentyneen painon vuoksi vastakaukalo ei vaadi suurta tukirakennetta, ja rakenteen suunnittelussa tavoiteltiin ratkaisua, missä vastakaukalo olisi mahdollisimman itsensä kantava. Tukirakenteissa käytettiin 50x50x5 mm ja 30x30x3 mm suorakaiderakenneputkea, jotka on valmistettu luokan S355 teräksestä.

Eristyksenä toimii kivivilla, ja eristyksen väliin asennettiin kaksi tukirautaa tukemaan eristyksen paikallaoloa (myös luokan S355 terästä). Pintamallinnukseen käytettiin 2 mm ruostumatonta ohutlevyä.

Päätyrakenteessa oleva loivennus on tarkistusluukku varten. Tarkistusluukun kautta saadaan tarkastettua radan kulku ilmauivaimen alla ja sen etäisyys suuttimiin nähden. Luukun kautta voidaan myös tutkia itse vastakaukalon sisätiloja, ja sen avulla saadaan tarkistettua myös mahdollisia ventiongelmiä. (Liite 1)

Ilmauivaimessa on vastaavasti loivenuksen täyttävä vastakappale, jossa luukku sijaitsee. Vastakaukalon päätyseinämän ja ilmauivaimen rakenteen väliin olisi kuitenkin hyvä asentaa tiivistyslista, jotta metallien välissä olisi materiaalia ottamaan vastaan lämpölaajenemisen. Näin saataisiin varmistettua riittävä tiiviys vastakaukalon päädyssä. Tämä vaikeutuu mallissa olevan loivenuksen vuoksi, ja kysymykseksi jääkin, voitaisiinko luukulle mietitty loivennus ja tarkistusluukku poistaa kokonaan. Näin sekä vastakaukalon että ilmauivaimen reunassa olisi tasainen pinta, mikä puolestaan olisi yksinkertaisempaa ja helpompaa tehdä ilmatiiviiksi tiivistyslistan avulla.

6.5.1 Versio 1

Ensimmäiseen versioon mallinnettiin mahdollisimman yksinkertainen ja kevyt tukirakenne, jonka avulla vastakaukalo saisi riittävän tuen. Runko koostuu käytännössä päätyosasta, sivuille ulottuvista runkopalkeista ja kahdesta näiden väliin asennettavasta tukirimasta.

Kaikki suorakaiderakenneputket ovat mitoiltaan 50x50x5 mm, tukirimat 30x5 mm ja eristyksenä toimii 50mm paksu kivivilla, joka on neljässä eri osassa. Eristys on sijoitettu ainoastaan vastakaukalon päätyyn ja alapohjaan, sillä näissä kohdissa on sille isoin tarve (Liite 1).

Tukirakenteen ja eristysten päälle tehtiin pintamallinnus käyttäen 2 mm ruostumatonta terästä. Pintalevyjen suunnittelussa otettiin huomioon asennukseen ja valmistukseen liittyviä asioita, ja kuinka ne olisivat mahdollisimman hyvät loppukokonaisuutta ajatellen. Näitä ovat mm. osien valmistettavuus ja asennettavuus/paikalleen kiinnittäminen (Liite 1).

Vastakaukalon kärkeen suunniteltuun lisälevyyn tehtiin lisäksi 20 mm kanttaus alaspäin. Kanttaus on välttämätöntä tehdä, jotta ohut teräslevy pitäisi muotonsa, eikä sen reunassa ilmenisi aaltoilua tai epämuodostumia. Kanttauksen avulla pintalevy saa tarvitsemansa jäykkyyden, eikä levyn pinnassa ole vastakaukalon yläpuolella kulkevan viiran radan pintaa vahingoittavia epämääräisiä muotoja (Liite 1). Liitteessä 1 on myös eriteltynä ensimmäisen version kokonaisuudessa sekä tukirakenteen, eristyksien ja pintametallien osuudet.

6.5.2 Versio 2

Kuten aiemmin mainittuna, toisen version suunnittelussa päädyttiin käyttämään kokonaan erilaista lähestymistapaa. Koska joissain asennuskohteissa ei vastakaukaloon voida valmistaa sivuja tai niiden tukirakennetta, täytyi malliin miettiä uusi ratkaisu, jotta poistuneiden sivujen tuoma tuki saataisiin kompensoitua ja rakenne olisi kuitenkin edelleen tukeva.

Yksi mahdollisuus olisi asentaa vastakaukalon sisään viistossa olevan pohjan ja päätyseinämän väliin teräksestä valmistettavia tukikolmioita, mutta tämä idea hylättiin käytännöllisistä syistä; tukikolmiot häiritsisivät ilmavirran käyttäytymistä vastakaukalon sisällä.

Toimivaksi ratkaisuksi valittiin vastakaukalon alla kulkevat tukipalkit. Nämä valmistettaisiin kolmesta osasta, ja kokonaisuudet hitsattaisiin jo valmiina olevan tukirakenteen rakenneputkeihin kiinni (Liite 1).

Mallissa vastakaukalon päädyssä oleva tukirakenne on edelleen sama mitä ensimmäisessä mallissa; rakenneputket ovat mitoiltaan 50x50x5 mm, tukirimat 30x5 mm ja eristyksenä toimii 50 mm paksu kivivilla. Mallin tarvitsemat alakautta kulkevat lisätuet ovat puolestaan valmistettu 30x30x3 mm suorakaiderakenneputkesta (Liite 1). Liitteessä 1 on myös eriteltynä toisen version kokonaisuudessa sekä tukirakenteen, eristyksien ja pintametallien osuudet.

6.5.3 Materiaalikustannukset

Materiaalikustannukset saatiin laskemalla erikseen jokaisen vastakaukalon mallinnuksessa käytettyjen osien omamassat. Laskelmissa käytetyt materiaalien hinta-arviot saatiin konsultoimalla projektin A parissa työskennellyttä ostopäällikköä (Liite 1).

Materiaalikustannuksiin käytetyt hinta-arviot ovat lähinnä suuntaa-antavia, ja vastakaukalon kokonaishintaa laskiessa täytyy ottaa huomioon myös työn hinta. Laskelmista voidaan kuitenkin päätellä, että reunavastakaukaloiden kanssa onnistutaan saavuttamaan selkeitä kustannussäästöjä niin rakenteen painossa kuin sen materiaalikustannuksissa (Liite 1).

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia mahdollisia kehitysratkaisuja ilma-kuivaimen päätyihin sijoitettaville reunavastakaukaloille ja niiden muodolle, kun kyseessä on yli 4 m ilma-kuivain. Ensimmäisenä lähdin tutkimaan ja tutustumaan projekti A:ssa toteutettuun ratkaisuun ja sen kautta saatuihin tuloksiin ja dataan. Tämän jälkeen tein asiantuntijahaastatteluita Valmetissa ja aloin teoriapohjalta pohtimaan mahdollisia ratkaisuja liittyen reunavastakaukaloon ja sen muotoon.

Työssä oli useita haasteita ja kysymysmerkkejä. Tämä on kuitenkin ominaista jokaiselle kehitystyölle. Haasteeksi nousi teoriapohjalta mietittyjen parannuksien ja ehdotusten vaikutus oikeassa mittakaavassa.

Koska reunavastakaukalon toimintaa tai sen avulla saatavien hyötyjen tarkkaa laskemista ja arviointia ilman pilotti-/testiprojektia on vaikeaa, oli vaikutusten arviointi haastavaa teoriapohjalta. Mallinnuksessa ja ohjelmoinnissa voitiin turvautua lähinnä tilastotieteelliseen lähestymiseen ja asiantuntijakokemukseen. Näillä ei kuitenkaan saada täysin selvää tulosta siitä, miten vastakaukalo toimisi oikeassa tehdasympäristössä.

Ensimmäinen vaihe oli vastakaukaloiden eri versioiden suunnitteleminen. Palaverien ja asiantuntijahaastatteluiden pohjalta valikoitui kuusi eri versiota, joiden mallinnuksien jälkeen testattiin niiden toimintaa virtausmallinnuksen avulla käyttäen Comsol Multiphysics-simulointiohjelmistoa. Tulosten avulla saatiin rajattua mahdolliset versiot, joissa voisi olla potentiaalia jatkokehitykseen. Näistä valittiin yksi, jonka pohjalta tein tarkemman 3D-mallinnuksen Catia V6 -suunnitteluohjelmistolla.

Malleista jatkokehityksen kohteeksi valikoitui malli 6. Valinta oli helppo, sillä kyseinen vastakaukalo tuotti positiivisia tuloksia virtausmallinnuksessa ja se sai myös teoriapohjalta positiivista palautetta palaverien kautta. Virtausmallinnuksessa näkyi selkeää ilmavirtojen käyttäytyminen, ja yleisesti niiden suunnat ja liikkuminen vastakaukalon sisällä olivat opinnäytetyön lopputuloksen kannalta positiiviset. Lisämuutoksena mallin kärjen reunarakenteeseen lisättiin 50 mm pitkä levy, joka lisäksi kantattiin alaspäin tarvittavan tuen saavuttamiseksi. Levy muodostaa kulkevan radan kanssa erillisen painevyöhykkeen, mikä pitää radan irti vastakaukalosta, mutta pysyy silti lähellä sitä.

Lopulta mallinnuksen kautta saatiin selville tiedot, joiden pohjalta voitiin arvioida mm. vastakaukalon materiaalikustannuksia, jotka on esiteltyä edellisessä kappaleessa. Opinnäytetyössä saatujen tuloksien pohjalta voidaan todeta, että reunavastakaukaloiden kanssa voidaan saavuttaa tuntuvia kustannushyötyjä. Vastakaukaloiden valmistus ja materiaalikustannuksissa saavutetaan merkittäviä säästöjä ja suunnitellun pituuden ja rakenteen ansiosta sen paino putoaa huomattavasti. Toteutetussa pilottiprojektissa A vastakaukalo asennettiin pituudeltaan yli 8 m ja leveydeltään yli 2 m ilmakeivaimeen.

Edellä esiteltyjen jatkokehitysversioiden 1 ja 2 pohjalta tehtyjen laskelmien kautta saatiin selville kummankin reunavastakaukalon suurpiirteinen paino. Kummankin mallin avulla saavutettaisiin huomattavia säästöjä mallien painossa verrattuna projektin A ratkaisuun, jossa vastakaukalon paino ilman kannakkeita oli 1850 kg. Versiolla 1 sama osuus kahden reunavastakaukalon muodossa olisi noin 329 kg ja versiolla 2 noin 392,2 kg. Tämä tarkoittaa 82,2 % säästöä painossa version 1 avulla ja 78,8 % säästöä painossa version 2 avulla. Laskelmissa ei ole otettu huomioon kannakkeiden tuomaa painoa (Kuva 18).

	Vastakaukalon paino (kg)
Projekti A	1 x 1850
Versio 1	2 x 164,5 = 329
Versio 2	2 x 196,1 = 392,2

	Säästö painossa vrt. projekti A
Vastakaukalo 1:	$\frac{(1850 - 329)}{1850} \times 100 = 82,2\%$
Vastakaukalo 2:	$\frac{(1850 - 392,2)}{1850} \times 100 = 78,8\%$

Kuva 17 Painoverailu

Valmetin kannalta seuraavana vaiheena vastakaukalon tuotekehityksessä on tärkeää tutkia, miten paperilinja käyttäytyy vastakaukalon reuna-alueella. Jos päädytään edellä esiteltyyn ratkaisuun, täytyy varmistaa radan käyttäytyminen mallin päädyssä, sillä tämä on yksi vastakaukalon tärkeimmistä ongelmakohtista. Esimerkiksi yksipuolisessa kuivaimessa paperilinja saattaa puhallettavan kuivausilman takia jäädä roikkumaan ja

sen profiili muuttua kuperaksi ilmakeivaimen keskikohdassa. Paperiradan riskitön kulku on ehdoton vaatimus, ja vastakaukalon pääty ei saa vahingoittaa tai aiheuttaa laatuongelmia millään tavalla.

Luontevin jatkumo kehitysprojektille on jatkokehittää vastakaukalon rakennetta ja valita tämän jälkeen parhaalta vaikuttava ratkaisu. Tämän jälkeen on vuorossa prototyypin valmistus, jotta laitteen toimintaa voidaan testata testiolosuhteissa. Prototyypin kautta saadaan tärkeää tietoa vastakaukalon toiminnasta, ja siitä, miten tuotekehityksen tulisi jatkua eteenpäin. Saadun datan kautta laitteen rakennetta ja toimintaa voidaan jatkojalostaa oikeaan suuntaan. Testikierrosten ja revisioiden kautta laitetta saadaan parannettua, ja näin päästään lopulliseen versioon, joka voidaan saattaa itse valmistusvaiheeseen.

Vastakaukalon tuotekehitykseen vaikuttavat useat asiat, jotka määrittelevät, miten laitteen rakennetta ja toimintaa tulisi kehittää. Muuttujia on paljon, ja tärkeinä kohtina ovat mm. paperiradan leveys ja sen kulkunopeus. Valmistettavalla paperilaadulla on myös iso merkitys vastakaukalon toimintaan, ja tämä tulisi ottaa myös tuotekehityksessä huomioon. Jos jokin paperilaatu vaatii tietynlaisen muutoksen, on tärkeää, että vastakaukalo on myös helposti säädettävissä, jotta tarve saadaan tyydytettyä. Tämä olettaen, että asia voidaan hoitaa hienosäätämällä vastakaukalon sijaintia tai asentoa paperirataan nähden esimerkiksi paikan päällä, kun laite on jo asennettuna. On kuitenkin hyvin mahdollista, että näin ei voida toimia, ja tietynlainen ratkaisu ei välttämättä toimi toisessa asennuskohteessa. Kyseisessä tilanteessa on tärkeää, että vastakaukalosta on erilaisia versioita. Näin Valmetilla olisi mahdollisuus tarjota erilaisia ratkaisuja, jotka soveltuisivat erilaisiin kohteeseen. Yleisesti vastakaukaloa voidaan käyttää sekä uusissa että uudistusprojekteissa.

Energiansäästöhyödyt ja niiden tutkiminen ovat tärkeitä kaikilla teollisuuden aloilla. Teollisuus kehittyy ja vaatii jatkuvia laiteparannuksia, jotta nykyaikaiset standardit sekä päästö- että energiatavoitteet saavutetaan. Tämän takia teollisuuden aloilla on tavoitteena saavuttaa parempia tuloksia niin päästöjen kuin energiatehokkuuden kannalta. Reunavastakaukaloiden avulla onnistutaankin saavutettua energiasäästöhyötyjä paperiradan ilmakeivaimen energiatehokkuuden paranemisen myötä.

LÄHTEET

Australian Government Department of the Environment and Energy. 2018. *Waste heat minimization and recovery*. Energy Exchange. Viitattu 5.11.2018. <https://www.eex.gov.au/technologies/waste-heat-minimisation-and-recovery>

I.Heikkilä, M.Huumo, S.Siitonen, P.Seitsalo & H.Hyytiä. 2008. *Teollisuuden energiatehokkuus*. Suomen Ympäristö 51. Viitattu 25.9.2018. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38378/SY_51_2008.pdf?sequence=1

Metsäyhdistys 2018. *Paperin valmistus*. Viitattu 7.9.2018. <https://smy.fi/sanasto/paperin-valmistus-manufacturing-of-paper-2/>

Oy Flinkenberg Ab. 2018. *Säänkestävät teräkset*. Viitattu 10.11.2018. <https://www.flinkenberg.fi/steel/teraslevyt/saankestavat-terakset/>

Rautaruukki. 2000. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. Säänkestävät teräkset ja niiden käyttö, 79. Viitattu 15.11.2018.

Rautaruukki. 2000. Rautaruukin terästuotteet. Säänkestävät rakenneteräkset. Suunnittelijan opas, 43. Viitattu 15.11.2018.

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 2018. *Standardit ja julkaisut*. Viitattu 10.11.2018. <https://sales.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2016. *Teollisuuden jätelämmöstä energiaa kaukolämpöön - päästöt puoliiksi*. Viitattu 22.9.2018. <https://www.vtt.fi/medialle/uutiset/teollisuuden-%C3%A4tel%C3%A4mm%C3%B6st%C3%A4-energiaa-kaukol%C3%A4mp%C3%B6n-%C3%B6st%C3%B6n-puoliiksi>

The Renewable Energy Hub. 2018. *The benefits of heat recovery system*. Viitattu 5.11.2018. <https://www.renewableenergyhub.co.uk/heat-recovery-systems-information/benefits-of-using-heat-recovery-and-ventilation-systems.html>

Tibnor Oy. 2018. *Ruostumattomat teräkset*. Viitattu 16.11.2018. <https://www.tibnor.fi/tarjontamme/materiaalit/ruostumattomat-terakset>

U.S. Department of Energy. Industrial Technologies Program. 2008. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. Viitattu 2.11.2018. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf

Valmet Oyj 2018. *About Us*. Viitattu 5.9.2018. <https://www.valmet.com/about-us/>

Valmet Oyj 2018a. *Board and paper machines*. Viitattu 7.9.9.2018. <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/>

Valmet Oyj 2018b. *OptiDry Coat Dryers*. Viitattu 10.9.3018. <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating-drying/air-dryers/>

Valmet Oyj 2008c. *OptiDry air drying family*. Viitattu 10.9.2018. <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating/coating-drying/>

Valmet Oyj 2018d. *Replace IR drying with OptiDry Coat to reduce energy consumption*. Viitattu 15.9.2018. <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/new-technology/FPOptiDryCoatHI/>